



TITLE:

高周波・熱気複合乾燥におけるス  
ギ材内部の水分移動に関する研究(  
Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

川井, 安生

---

CITATION:

川井, 安生. 高周波・熱気複合乾燥におけるスギ材内部の水分移動に関する研究. 京都大学, 2004, 博士(農学)

ISSUE DATE:

2004-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r11473>

RIGHT:

高周波・熱気複合乾燥における  
スギ材内部の水分移動に関する研究

2004

川井 安生

高周波・熱気複合乾燥における  
スギ材内部の水分移動に関する研究

2004

川井 安生

# 目 次

緒 言 .....	1
第1章 スギ製材の乾燥に関する既往の研究 .....	4
1. 1 概 説 .....	4
1. 1. 1 乾燥の歴史と問題点 .....	4
1. 1. 2 乾燥および水分管理の必要性 .....	5
1. 2 乾燥法 .....	6
1. 2. 1 乾燥法の分類 .....	6
1. 2. 2 乾燥法による得失 .....	7
1. 3 高周波・熱気複合乾燥法 .....	8
1. 3. 1 着想に至る経過 .....	8
1. 3. 2 乾燥法における位置付け .....	9
第2章 高周波・熱気複合乾燥法の実用性 .....	10
2. 1 実用装置の概要と特徴 .....	10
2. 1. 1 構 造 .....	10
2. 1. 2 操作法 .....	12
2. 2 乾燥の樹種特性 .....	13
2. 2. 1 実験方法 .....	13
2. 2. 2 結果と考察 .....	14
2. 3 材種と乾燥特性 .....	16
2. 3. 1 実験方法 .....	19
2. 3. 2 結果と考察 .....	20
2. 4 乾燥エネルギーコストの試算 .....	32
2. 4. 1 実験方法 .....	32
2. 4. 2 結果と考察 .....	32
2. 5 要 約 .....	36

第3章 高周波・熱気複合乾燥における水分移動の駆動力 .....	38
3. 1 含水率分布の推移 .....	38
3. 1. 1 実験方法 .....	38
3. 1. 2 結果と考察 .....	41
3. 2 高周波加熱の関与 .....	45
3. 2. 1 実験方法 .....	46
3. 2. 2 結果と考察 .....	48
3. 3 高周波加熱による水分流出 .....	67
3. 3. 1 実験方法 .....	67
3. 3. 2 結果と考察 .....	67
3. 4 材内圧力の関与 .....	70
3. 4. 1 実験方法 .....	70
3. 4. 2 結果と考察 .....	70
3. 5 要 約 .....	74
第4章 高周波加熱と熱気乾燥の複合効果 .....	75
4. 1 熱気乾燥との比較 .....	75
4. 1. 1 実験方法 .....	75
4. 1. 2 結果と考察 .....	78
4. 2 高周波・熱気複合乾燥と高温乾燥との差異 .....	85
4. 2. 1 実験方法 .....	85
4. 2. 2 結果と考察 .....	87
4. 3 要 約 .....	93
総 括 .....	94
文 献 .....	97
謝 辞 .....	100

## 緒 言

我が国の森林は、戦後の拡大造林の結果、針葉樹一辺倒の状態に陥り、林業も木材利用も、スギを中心とした建築用針葉樹材への取り組みが重要となっている。しかも、拡大造林が進んだ結果、35年生以下のスギ小、中径材の割合が高くなり、その用途を考えると、建築用構造材として心持ち材がその主体にならざるを得ない。スギを利用するとき、従来は、伐倒後の林地で長期間の葉枯らし（渋抜きともいう）を行って、余分の水分を除いたのちに製材し、工場内で自然乾燥して、さらに数年の建築期間を経たのちに建物となっていた。しかし、経済の高速化は木材乾燥をも高速化して、自然乾燥から人工乾燥へと移行を促し、いまや120～250℃の熱エネルギーを一時に投下する高温乾燥へと移りつつある。この現実を資源問題や環境問題の面から考えるとき、ある疑問を抱かざるを得ないが、しかし一方、スギ材の利用においては、輸入材との競合、住宅品質確保促進法（品確法）制定などの点から、品質管理の厳格化は避けられない。ここでは、省エネルギーであり、環境負荷の少ない乾燥方法や技術の開発が求められることになる。

一方、品確法のねらいは2つある。その1つは、住宅の性能を10年間にわたって保証する瑕疵保証制度で、瑕疵担保責任が義務化されている。他の1つは、住宅の品質レベルを明示する住宅性能表示制度である。品確法は、住宅に用いられる部材（柱や梁など）の強度や寸法安定性を重要視し、乾燥（水分管理）が不適切なために生じる損傷、すなわち、部材の収縮や膨張による寸法変化が引き起こす変形、柱や壁面の割れ、床面の傾斜、あるいは床鳴りなどの解消をねらいとしている。その要求を満たすためには、用途に適した含水率状態に乾燥して寸法安定性を与え、かつ、品質のばらつきを制御することが求められる。

スギ心持ち正角材は、心材の水分透過性が悪く<sup>1)</sup>、材中心部に水分が残留し易い<sup>2)</sup>ために、通常の熱気乾燥で内部水分を平準化するには、長時間にわたって

熱エネルギーを投下し続ける必要がある<sup>3)</sup>。一方、乾燥時間の短縮をねらって高温乾燥を適用すると、乾燥温度による材質劣化や変色あるいは内部割れが発生しやすい欠点がある<sup>2,4)</sup>。そのために、正角材のような断面の大きなスギ製材は難乾燥材とされ、品質を維持しつつ、短時間、低コストで乾燥することは、従来の乾燥法では困難であるとされている。そのためにスギ製材の多くは、不適切な乾燥状態で市場に供給される場合が多く、建築過程や建築後に寸法変化、変形あるいは割れなどの損傷を引き起こし、スギ製材の建築用材料としての信頼度を低下させる原因の1つになっている。

木材の水分透過性を改善することによって乾燥性を向上させる試みとして、人工乾燥に先立って種々の前処理を施すことが提案されている<sup>5-9)</sup>。また、短時間で内部まで乾燥できる方法として、減圧下で高周波加熱する高周波真空乾燥があり、木材全体をほぼ均一に加熱することによって、大断面材であっても内部水分を効果的に除去でき、小さな水分傾斜でほぼ均一に乾燥できるので<sup>10)</sup>、広葉樹材や断面の大きな針葉樹製材ともに多くの研究がなされている<sup>11)</sup>。

著者は、木材に高周波を印加すると内部まで急速に加熱できることと、被加熱材の中心に近い部分は、表層付近に比べて高温になり、周囲よりも高い材内圧力が得られて、表層との間に蒸気圧差が生じることに注目した。材内圧力の作用により、乾燥初期には内部から表層への自由水の流動が期待できる。しかし、高周波乾燥は、多量の電気エネルギーを消費するために、乾燥コストが高くなる。また、乾燥中期以降には、蒸気圧差が水分移動の駆動力として作用し、水分拡散を促進させることが期待できる。

一方、従来の熱気乾燥によれば、表層の水分は容易に除去できるが、内部水分の除去には長時間を要する。そこで、高周波加熱と熱気乾燥とを複合した乾燥法（以下、高周波・熱気複合乾燥法という）を用いれば、両者の欠点を補い、長所を生かすことができる。すなわち、スギ正角材のような断面寸法が大きく、しか

も水分透過性が悪い材でも、熱気乾燥のみの場合に比べて、短時間で内部まで乾燥できることになり、結果的には低コスト乾燥法で、スギ製材の有効な乾燥法になり得ると考えた。

そこで、まず第1章では、スギ製材の乾燥に関する既往の研究について概観し、これまでの乾燥法の得失、問題点を整理し、高周波・熱気複合乾燥を着想するに至った経過を述べる。

第2章では、高周波・熱気複合乾燥の実用性に関して、まず、実用装置の概要と特徴を述べる。さらに、その実用装置を用いて、樹種あるいは断面形状の異なる材の乾燥特性を調べ、個々の場合の乾燥コストを試算した結果について述べる。

第3章では、高周波・熱気複合乾燥における水分移動の駆動力を明らかにすることを目的に、乾燥過程における含水率分布の推移、水分移動における高周波加熱の役割を検討する。さらに、高周波加熱によって生じる液相水分の流出、それに対する材内圧力の寄与について検討する。

第4章では、高周波加熱と熱気乾燥との複合効果を明らかにするために、熱気乾燥および高温乾燥と、高周波・熱気複合乾燥との材内温度、材内圧力、含水率分布の推移を比較し、高周波・熱気複合乾燥の機構について検討する。



## 第1章 スギ製材の乾燥に関する既往の研究

スギ材を対象とした乾燥法を開発し、その水分移動の機構を研究するうえで、スギ材の乾燥を取り巻く状況を十分に把握し、現在用いられている他の乾燥法との比較を行って、その位置付けを理解する必要がある。

本章では、1.1において、スギ製材の乾燥の歴史と問題点、ならびにスギ製材の乾燥、水分管理および品質管理の必要性について述べる。1.2において、現在スギ製材に適用されている各種の乾燥法の得失と、スギ製材の乾燥法における高周波・熱気複合乾燥の位置付けを述べる。1.3において、高周波・熱気複合乾燥法の考え方とその位置付けを述べる。

### 1.1 概 説

#### 1.1.1 乾燥の歴史と問題点

以前の我が国の住宅建築では、建築期間が長かったため、住宅の完成までに部材が自然乾燥されていた。また、住宅は開放的で気密性が低く、平衡含水率が大気中のそれと同等であったので、施工後に問題が生じることはなかった。その後、建築期間が短くなったことと、冷暖房装置の普及によって気密性が高くなり、平衡含水率の低い環境で木材が使われるようになったことから、建築後に部材の狂いなどの問題が発生するようになった。これに対応し、構造用針葉樹製材の人工乾燥が注目され始めた。しかし、針葉樹材には、人工乾燥は不要という従来の考え方や、乾燥による歩留まりの低下、大断面材であること、また、乾燥技術が未熟であったことなどから、構造用針葉樹製材の人工乾燥は、なかなか普及しなかった。

一方、集成材には接着工程が含まれるため、ラミナには精度の高い人工乾燥が

なされていた。インターナルファン（IF）型乾燥機は、安全に速く精度よく乾燥できるが、蒸気ボイラーを必要とし、その管理が必須である。そのために、蒸気が必要とせず、電気で乾燥できる除湿乾燥機が導入された。この装置は、取り扱いも簡単であり、低温で乾燥ができ、材色変化が小さいため、針葉樹材の乾燥に一時的ではあるが爆発的に普及した。しかし、乾燥温度が低いので、乾燥時間が長いこと、乾燥むらが多いこと、電気料金が安いこと、また、装置の故障が多かったことなどから、現在では、低温乾燥法としてヒノキ材の乾燥に特化されている。この乾燥法は、熱循環の点では理想に近いが、乾燥速度が小さいという点でスギ製材には不向きであった。しかし、この頃から構造用針葉樹製材を乾燥することの必要性が広く認識され始めた。

乾燥温度を上げると、乾燥時間は短縮されるが、表面割れや内部割れ、あるいは落ち込みが多くなり、100℃以上の高温乾燥は考えられなかった。しかし、針葉樹材では表面割れが少なくなることから、1970年頃に北米で高温乾燥が研究され始めた。装置の耐久性、材質変化、乾燥むらなどの点で問題があったが、水分透過性の良いラジアータパイン材では急速乾燥法として普及している。この乾燥法は、我が国でもスギ製材の人工乾燥法として近年注目されている。

### 1.1.2 乾燥および水分管理の必要性

木材乾燥は、木材加工における最も基礎的で重要な工程の1つである。木材製品にトラブルが発生した場合、その原因は乾燥に起因していることが多い。

伐採したばかりの木材には多くの水分が含まれているので、そのまま使うと乾燥して収縮したり、割れたり、狂ったりする。これを防ぐために、古くから天然乾燥が行われてきたが、この乾燥法で到達できる含水率は15%程度にとどまる。これよりも低含水率を要する住宅部材、建築用材、家具、および集成材ラミナの乾燥には、さらに人工乾燥が行われる。

住宅部材にとって乾燥が大切な理由は、以下のとおりである。

- ①乾燥により、重量が減少し、輸送や取り扱いが容易になる。
- ②乾燥により、強度性能が高まるとともに、加工性や塗装性が良好になる。
- ③十分乾燥されずに使用されると、収縮が生じ、狂いや割れが起こりやすい。
- ④十分乾燥されずに使用されると、カビ、変色菌や昆虫に犯されやすい。

近年、生活様式の変化に伴って、住宅が気密構造になったこと、住宅構造が多様化したことなどの理由から、住宅部材の水分管理の要求基準がより厳しくなってきた。

木材は、多様な機能を持つ材料であり、様々な部材として建築物に用いられ、それぞれの用途によって求められる性能が異なる。今後、木材が建築材料としての地位を確立するためには、適切な乾燥技術と乾燥装置に基づいた適切な人工乾燥が要求される。

## 1. 2 乾燥法

### 1. 2. 1 乾燥法の分類

木材の乾燥法には、次のものがある。

- ①熱気乾燥法：蒸気や電気ヒーターで木材を外部から加熱して乾燥する。
- ②高周波真空乾燥法：高周波で木材を内部加熱，減圧して乾燥する。
- ③マイクロ波乾燥法：マイクロ波で木材を内部から加熱して乾燥する。
- ④熱板乾燥法：熱板で木材を圧縮加熱して乾燥する。
- ⑤除湿乾燥法：除湿器で乾燥装置内の相対湿度を下げて，低温で木材を乾燥する。
- ⑥太陽熱乾燥法：太陽熱を利用して木材を乾燥する。
- ⑦薬品乾燥法：薬剤中で加熱あるいは置換して木材を乾燥する。

これらは、加熱方法の方法と機構の違いによって、大きく2つに分類できる。

すなわち、加熱空気の対流あるいは熱板からの熱伝導など外部から熱を与える外部加熱と、高周波やマイクロ波などの電磁波を用いて、内部温度を先行して上昇させる内部加熱との2つである。

## 1. 2. 2 乾燥法による得失

現在、現場で用いられている主な乾燥法について、その得失を述べる。

### 1) 熱気乾燥法

これは、現在最も普及している乾燥法である。乾燥室内の空気を蒸気で加熱し、湿度を生蒸気で調節したうえで、インターナルファン（IF）で空気循環させることによって木材を乾燥する。乾燥温度は100℃以下であり、高温乾燥に対して中温乾燥と呼ばれることもある。

利点として、①乾燥室内の温湿度制御が容易であり、幅広い乾燥条件を作り出せるので、多様な樹種、材質、材種に適用できる、②大量の材を同時に処理することができる、③ランニングコストが比較的低いことなどが挙げられる。

欠点として、①断面の大きな材では、乾燥終了までに長時間を要する、②心持ち材では、表面割れの発生を防ぐことが困難であることなどが挙げられる。

### 2) 高温乾燥法

熱気乾燥の1種であるが、乾球温度100℃以上の乾燥条件を用いるものである。

利点として、①中温乾燥の2～5倍の乾燥速度が期待できる<sup>12)</sup>、②乾燥初期に高温低湿条件を適用して、表面割れを抑制できる<sup>13)</sup> ことなどが挙げられる。

欠点として、①湿度制御が難しい、②内部割れが発生しやすい<sup>2)</sup>、③材色が変化する<sup>14)</sup>、④曲げ強度、衝撃強さが、かなり低下することなどが挙げられる。

### 3) 高周波真空乾燥法

真空ポンプを用いて、真空缶体内を40～50mmHgに減圧し、水の沸点を30～40℃に下げるとともに、高周波加熱して木材を乾燥する。高周波加熱を用いて、

材温を 40 ～ 60℃に加熱することで乾燥する<sup>11)</sup>。

利点として、①熱気乾燥の 10 倍程度の乾燥速度が期待できる<sup>15)</sup>、②大断面材を乾燥できる、③変色や割れが少ないことなどが挙げられる。

欠点として、①ランニングコストが高い、②一度に大容量の材を乾燥できないことなどが挙げられる。

### 1. 3 高周波・熱気複合乾燥法

#### 1. 3. 1 着想に至る経過

木材に高周波を印加すると、内部まで急速に加熱できることと、中心に近い部分は表層付近に比べて高温になり、周囲よりも高い材内圧力と蒸気圧差が得られることに注目した。前者の作用により、乾燥初期には、内部から表層への自由水の流動が期待できる。また、乾燥中期以降には、後者が水分移動の駆動力として作用し、水分拡散を促進させることが期待できる。表層の水分は、従来の熱気乾燥で容易に除去できるので、高周波・熱気複合乾燥法を用いれば、スギ正角材のように断面寸法が大きく、しかも水分透過性が悪い材でも、熱気乾燥のみの場合に比べて短時間で内部まで乾燥できることになり、結果的には低コスト乾燥法になり得ると考えた。

常圧下で高周波加熱と熱気乾燥を同時に行う高周波・熱気複合乾燥法については、スギ正角材に適用した場合の乾燥速度や、乾燥仕上がり状態あるいはコストが論じられている<sup>16-18)</sup>。しかし、この乾燥法の有効性を考察するための基礎となる材内圧力や、水分移動機構については検討されていない。もともと、スギ正角材の生材含水率は、辺心材ともに高い場合が多く、しかも心材の水分透過性は悪い<sup>1)</sup>といわれている。そのために、従来の熱気乾燥では、心持ち正角材の中心付近に水分が残留して、大きな水分傾斜ができ易く<sup>2)</sup>、割れなどの損傷が生じ

る。これを解決しようとする、乾燥時間が著しく長引く<sup>3)</sup>。また、高温乾燥では、強度低下や変色などの材質劣化を引き起こす<sup>4)</sup>ことや、高周波真空乾燥では、乾燥コストの問題<sup>8)</sup>などの短所があつて、単一の乾燥法では、スギ製材を適切に乾燥することが困難であつた。

高周波・熱気複合乾燥法に取り入れた高周波加熱は、内部加熱法であり、材中心付近の水分を効果的に除去するのに適した方法<sup>19)</sup>とされている。一方、熱気による外部加熱法では、表層の水分除去は容易であるが、材内に大きな水分傾斜が生じやすい。しかし、これらを併用すれば、補完的な2つの水分移動現象が複合的に生じて、単一乾燥法では生じやすい乾燥上の障害を回避できる可能性がある。以上の考え方に基づいて、高周波・熱気複合乾燥法をスギ正角材に適用した。

### 1. 3. 2 乾燥法における位置付け

従来、高周波加熱は、減圧乾燥と組み合わせて、高周波真空乾燥として用いられていた。しかし、機構の異なる2つの加熱法、熱気と高周波を組み合わせることによって、それぞれの利点を活かした新しい乾燥法が考えられる。この乾燥法では、高周波加熱で大断面材を急速に乾燥できること、熱気で雰囲気の緻密な制御ができること、大容量の材を乾燥できること、また、ランニングコストを安くできることが利点となるであろう。この結果、常圧下における熱気乾燥と高周波加熱との複合乾燥法が開発された。外部加熱と内部加熱とを同時に行い、かつ複合効果を示すような乾燥法は前例がなく、この点に高周波・熱気複合乾燥法の新規性と優位性がある。

## 第2章 高周波・熱気複合乾燥法の実用性

スギ製材の乾燥および水分管理が求められているにもかかわらず、品質、コストなどの点において、実用的に有効な人工乾燥法はいまだに確立されていない。短時間で高品質の乾燥材が得られることの外に、実用上は、低コストで乾燥できることが重要である。

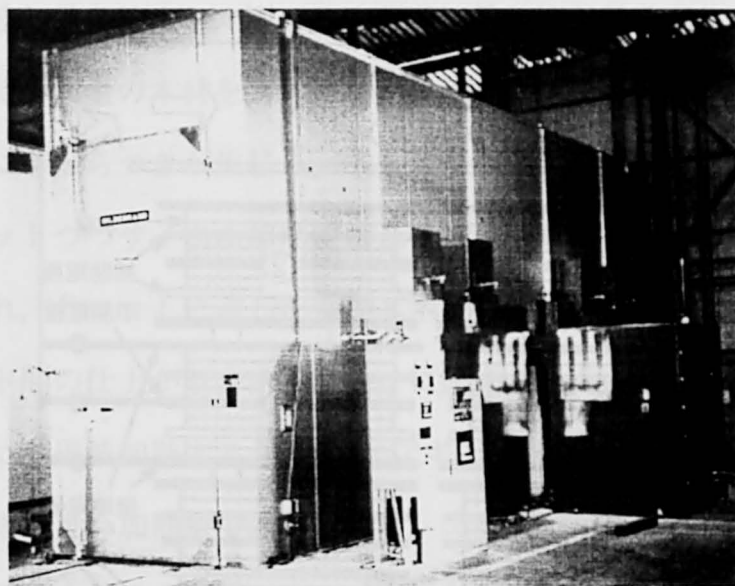
本章では、実大の実証実験機を作製し、高周波・熱気複合乾燥法の実用性を検証する。2.1では、高周波・熱気複合乾燥装置の概要と特徴を、2.2では、異なる樹種の乾燥特性を、2.3では、異なる材種の乾燥特性を、2.4では、乾燥コストについて論じる。

### 2.1 実用装置の概要と特徴

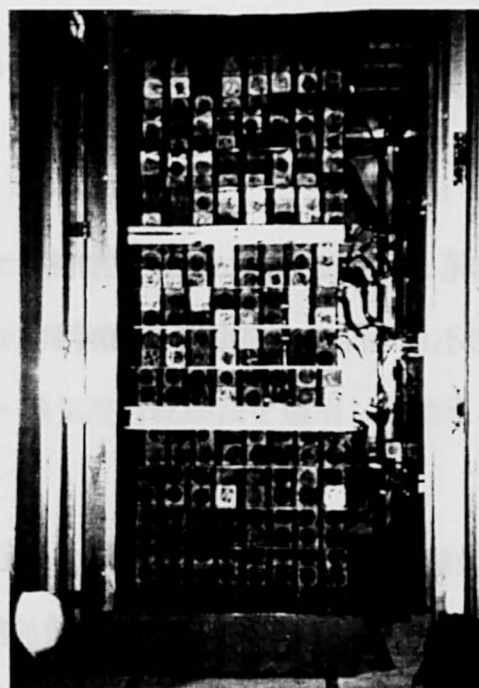
本節では、実用試験に用いた高周波・熱気複合乾燥装置の構造と操作法等を概説し、特徴を述べる。

#### 2.1.1 構造

実用に供されている高周波・熱気複合乾燥装置の外観(a)と被乾燥材を収容した乾燥装置内部(b)を図2-1に示す。本装置は通常の高周波式乾燥装置(蒸気加熱式IF型、収容材積 $22\text{m}^3$ )に高周波発振機(発振周波数 $13.56\text{MHz}$ 、定格出力 $40\text{kW}$ )が組み合わされており、常圧下で熱気乾燥と同時に高周波加熱が可能である。装置の構造を図2-2に示す。印加電極と接地電極の2つの電極間に木材をべた積みしてロット(図中の①～⑥)とし、複数のロットを同時に収容して乾燥できる。材をべた積みするため、熱風を材の横方向から送風することはできないので、材の長さ方向に送風する構造となっている。高周波加熱は、1ロット



(a) 乾燥装置の外観



(b) 乾燥装置内部

図2-1 実用高周波・熱気複合乾燥装置



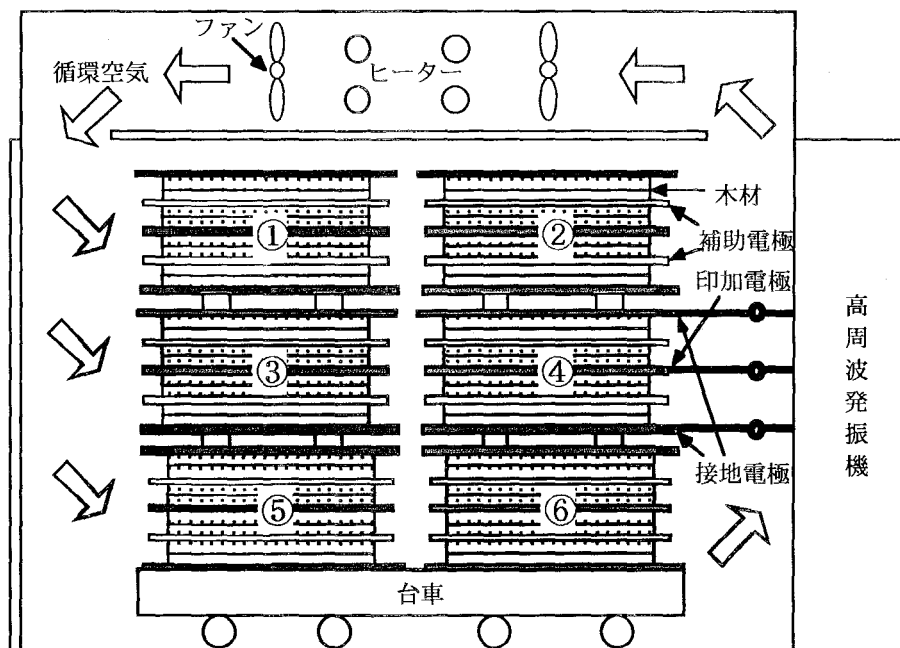


図2-2 実用高周波・熱気複合乾燥装置の構造

トずつ順番に行う。収容した木材を一度に高周波加熱せず，ロットに分けることによって，比較的容量の小さい高周波発振機で加熱することが可能である。

## 2. 1. 2 操作法

高周波・熱気複合乾燥法は，①高周波加熱を材の中心温度で制御する，②重量分別してロットに分け，1ロットずつ順番に高周波加熱する（サイクル加熱），③栈木を用いず電極間にべた積みするなどの，従来の熱気乾燥とは異なる乾燥操作を必要とする。これらの操作を行うことによって，正角材のような大断面材でも大きい乾燥速度を得ると同時に，過熱による材の損傷を防ぐことができる。材内圧力を十分に上昇させることと，材の損傷および材質劣化を考慮して，常圧下における水の沸点を最小限上回る  $101^{\circ}\text{C}$  とした。材の中心温度が  $101^{\circ}\text{C}$  に到達し

たときに高周波加熱を停止し、別のロットの加熱に切り替えられる。初期含水率にばらつきを持つ大量の木材を、同時に同じ乾燥スケジュールで乾燥すると、仕上がり含水率にもばらつきが生じる。あらかじめ材の重量などで分別し、ロットに分けて1ロットずつサイクル加熱することで、各ロットの水分量に応じて加熱時間が増減され、各ロットに適した量のエネルギーを投下することができる。その結果、ロット間の仕上がり含水率を均一に揃えることが可能である。このとき、積木を用いずに高周波加熱するために、エアギャップがなく、電極間距離が短く、エネルギー効率の良い加熱ができる。また、エアギャップがないために、放電による火災の危険が小さくなる。その一方で、熱気乾燥に関しては、積木を用いないことは、熱風と材との接触面積が小さくなって不利であるので、水平方向の材間を広く空けて、この欠点を解消している。

## 2. 2 乾燥の樹種特性

本節では、スギ材とヒノキ材とについて、高周波・熱気複合乾燥法の適用効果と、これら2つの樹種の混載乾燥の可能性とについて検討する。また、ラジアータパイン材に高周波・熱気複合乾燥法を適用した結果について述べる。

### 2. 2. 1 実験方法

長さ3mの、スギ(*Cryptomeria japonica* D. Don) およびヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* Endl.) の心持ち正角材について、それぞれの辺長が11.5cmと13cmの2材種をそれぞれ64本、計256本を供試材として、同時に高周波・熱気複合乾燥した。スギ材およびヒノキ材については、1樹種、1材種ごとに8列×8段(計64本)をべた積みして1ロットとした。各樹種ごとに上段に13cm正角材のロット、下段に11.5cm正角材のロットを配置して、2段積

みで収容した。高周波容量式の含水率計（ケット科学製モコ2）を用いて、乾燥前後の含水率を測定した。また、各ロットから6本ずつの試験材を選抜し、木口から20cm以上繊維方向に離れた位置から繊維方向長さ3cmの含水率分布測定用試験片を採取し、全乾法で含水率分布を求めた。

また、樹脂を多く含んだ材として、ラジアータパイン（*Pinus radiata* D. Don）のフリッチ材16本および板材106枚を供試材とした。ラジアータパイン材については、材種ごとにべた積みして1ロットとし、上段にフリッチ材のロットを、下段に板材のロットを配置して、2段積みで収容した。

各ロットの上下に接地電極板、中央に印加電極板を配置し、その中間に均一な電界を得るための補助電極板を配置した。1ロットあたりに1本の試験材をロットの印加電極板直上に配置した。試験材の長さ方向の中央部において中心、表層、および中心と表層との中間（以下、中間部という）まで達する小孔を穿孔し、その小孔に光ファイバー温度計（高岳製作所製 FT-1110）を埋め込んだ。中心温度を指標にして徐々に昇温し、101℃で高周波加熱を ON-OFF 制御した。同時に乾球温度 80℃、乾湿球温度差 0～8℃で熱気乾燥した。

## 2. 2. 2 結果と考察

### 1) スギ材とヒノキ材の混載乾燥

図2-3に、11.5cmと13cmのスギおよびヒノキ正角材の横断面内における含水率分布を示す。乾燥前の含水率分布は、スギ材とヒノキ材では、大きく異なることがわかる。すなわち、スギ材では心材含水率が高く、中心部の含水率が約150%を示したのに対し、ヒノキ材では心材含水率が30～40%で低く、辺材含水率は約100%を示して、大きな含水率むらが見られた。ヒノキ材の乾燥後の含水率分布は、表層から中心までほぼ20%で均一に乾燥されていた。これらを含水率計で測定すると、乾燥前の含水率は、スギ11.5cm材と13cm材でそれ

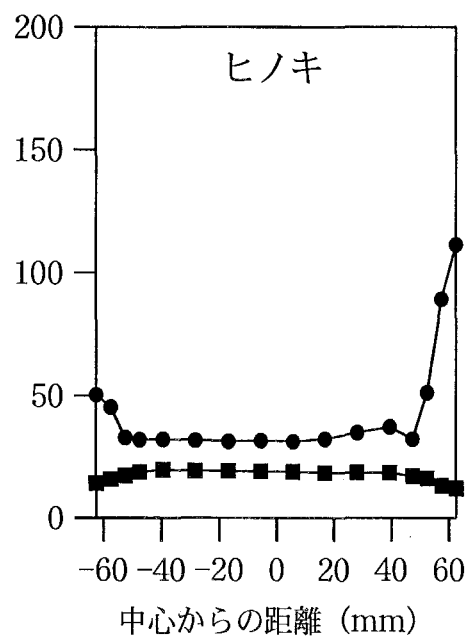
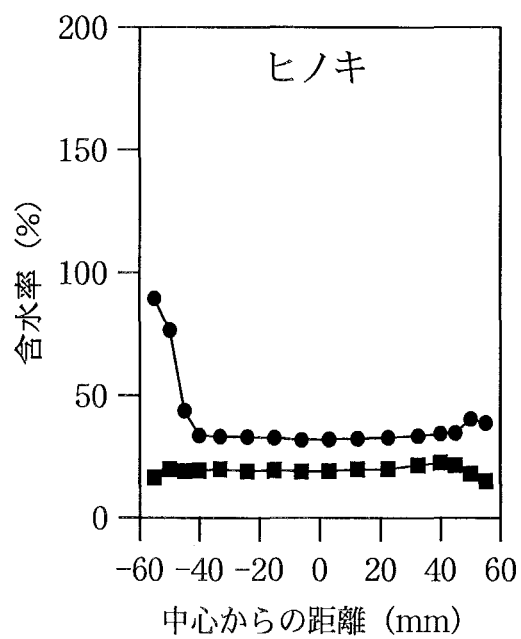
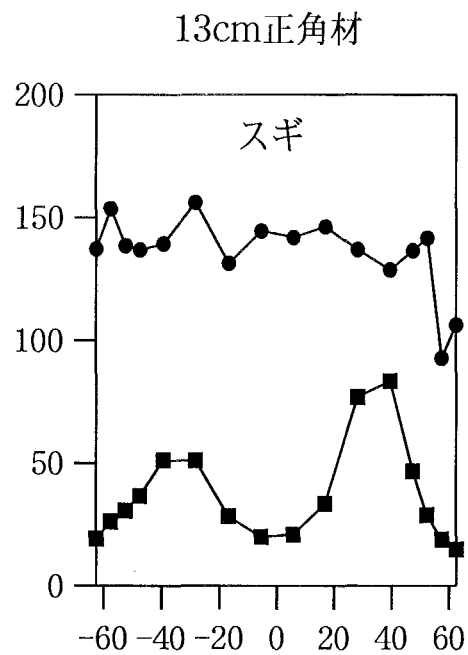
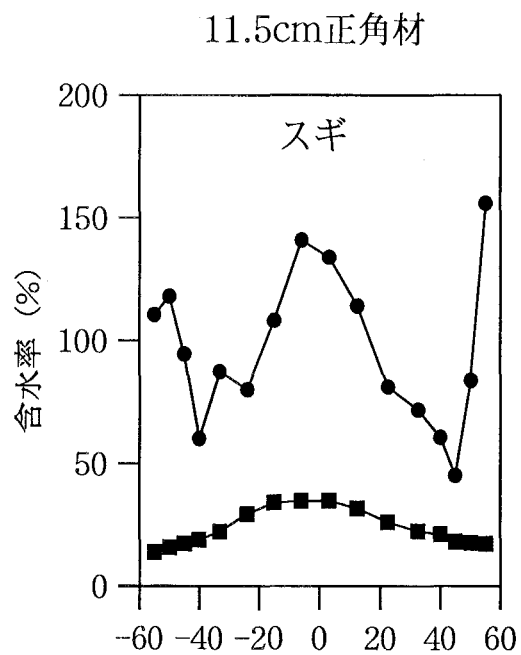


図2-3 スギ材とヒノキ材の横断面内における含水率分布

● : 乾燥前 ; ■ : 乾燥後

ぞれ、102, 120%, ヒノキ材ではそれぞれ54, 37%であった。この結果からわかるようにスギ材の生材含水率はヒノキ材のそれを大きく上回っていた。

スギ材とヒノキ材の乾燥前に対する乾燥後の重量の関係を図 2-4 に示す。乾燥前の重量が同じスギ材とヒノキ材とを比較すると、乾燥後の重量は、スギ材の方が小さくなっている。ここで注目すべきことは、スギ材とヒノキ材の回帰直線がほぼ等しい傾きを示していることである。回帰直線の傾きは乾燥の程度を表すので、傾きが等しいことから、ロットに分別することによって、スギ材とヒノキ材とを混載しても均一な乾燥が可能であることがわかる。

## 2) ラジアータパイン材

36 時間の高周波・熱気複合乾燥後のラジアータパイン材の材面に滲出した樹脂の状態を図 2-5 に示す。通常の乾燥法では、滲出した樹脂が材面を覆いつくすことはないが、この図からは、滲出した樹脂が、材表面全体を覆っている状況が観察できる。この現象は、樹脂を材表面に押し出す力が働いたことを示唆する。その駆動力として、材内圧力の上昇が考えられる。材表面に押し出された樹脂が、材表面をコーティングしてシールの役割を果たしたために、表層の乾燥が停滞したが、一方では、高周波・熱気複合乾燥法をラジアータパイン材に適用することにより、建築施工後のヤニによる材面の汚染を抑制することが可能である。

## 2. 3 材種と乾燥特性

木材の乾燥速度は、断面形状に大きく依存し、材の厚さが2倍になると乾燥時間は1.5～2乗倍になる<sup>20)</sup>といわれる。その理由は、表面からの蒸発速度に比べて、材内で水分が拡散する速度が小さいためである。そのため、従来の熱気乾燥では、正角材のような大断面寸法の製材を乾燥するには長時間を要した。

本節では、断面形状の異なるスギの正角材、平割材および平角材について、高

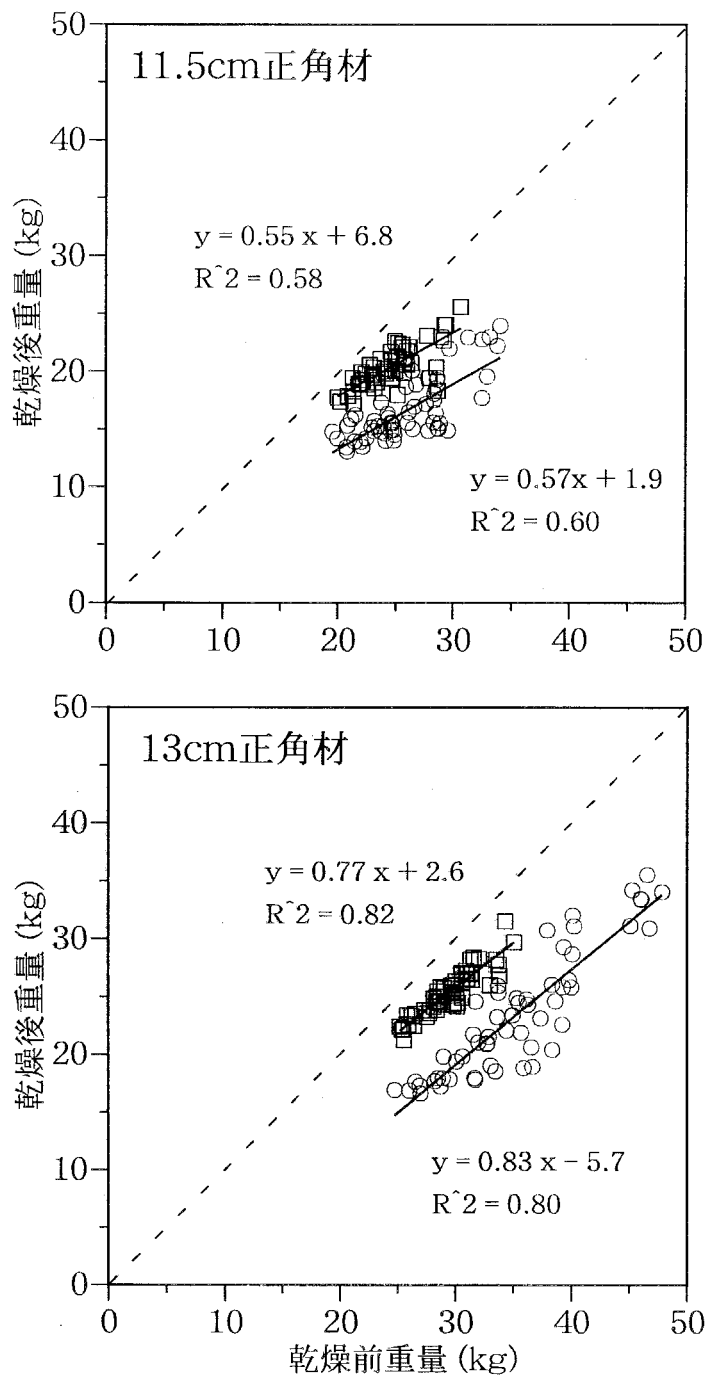


図2-4 スギ正角材とヒノキ正角材の乾燥前後の重量  
○：スギ；□：ヒノキ



(a) フリッチ材



(b) 板材

図2-5 ラジータパイン材の材面に滲出した樹脂



周波・熱気複合乾燥法を適用したときの乾燥特性について述べる。

## 2. 3. 1 実験方法

### 1) 平割材と正角材の混載乾燥

長さ 3m の、スギ板目平割材 ( $2.7 \times 11.5\text{cm}$ ) 256 枚と 11.5cm スギ心持ち正角材 64 本を供試材とした。平割材は、4 枚重ねて厚さ 10.8 × 幅 11.5cm のブロックを作り、これを 8 段べた積みして 1 ロットあたり 8 列 × 8 段とした。正角材は、8 列 × 8 段を 1 ロットとした。したがって、断面形状は異なるが、材積および電極間距離はほぼ同じである。それらの 2 ロットを、上段には正角材ロットを、下段には平割材ロットを配置して、2 段積みで収容した。乾球温度  $80^{\circ}\text{C}$ 、乾湿球温度差  $0 \sim 8^{\circ}\text{C}$  で 26 時間の高周波・熱気複合乾燥を行った。

### 2) 正角材

長さ 3m で、辺長が 11.5cm のスギ心持ち正角材を、1 ロットを 8 列 × 8 段として、1 回の乾燥につき 3 ロット (192 本) または 6 ロット (384 本) を高周波・熱気複合乾燥した。供試材を材の重量で 3 グループに分別し、上段に重量級のロット、中段に中量級のロット、下段に軽量級のロットをそれぞれ配置し、3 段積みとした。6 ロットの場合は、3 段 × 2 列の配置とした。計 4 回の実験を行い、総数 1152 本の供試材を乾球温度  $80^{\circ}\text{C}$ 、乾湿球温度差  $0 \sim 12^{\circ}\text{C}$  で高周波・熱気複合乾燥した。

### 3) 平角材

$12\text{cm} \times 23.5\text{cm} \times 4\text{m}$  および  $12\text{cm} \times 26.5\text{cm} \times 3.65\text{m}$  のスギ平角材を、それぞれ 128 本と 64 本、計 192 本 ( $21.86\text{m}^3$ ) を同時に供した。1 ロットを 32 本として 6 ロットに分別し、乾球温度  $80^{\circ}\text{C}$ 、乾湿球温度差  $0 \sim 8^{\circ}\text{C}$  で 186 時間の高周波・熱気複合乾燥を行った。



## 2. 3. 2 結果と考察

### 1) 平割材と正角材

乾燥時間が26時間と短かったため、平均仕上がり含水率は正角材で37%、平割材で42%であり、十分な乾燥はできなかった。しかし、繊維飽和点以上の含水率における断面形状の違いによる乾燥速度の差を確認することができた。正角材と平割材の乾燥前に対する乾燥後の重量の関係を図2-6に示す。両者の対比のために、平割材のプロットは1ブロック（4枚）の合計重量としている。単位材積あたりの電力消費量は、正角材で185kWh、平割材で203kWhであり、ほぼ同等のエネルギーが投下されているが、平割材の重量減少が正角材のそれより大きいことがわかる。通常の熱気乾燥法でべた積みすると、材面からの水分蒸散は期待できない。しかし、高周波・熱気複合乾燥では、べた積みした場合であっても、べた積みした材面間の隙間を通して、材内水分の外部への移動が行われ、乾燥が進行した。

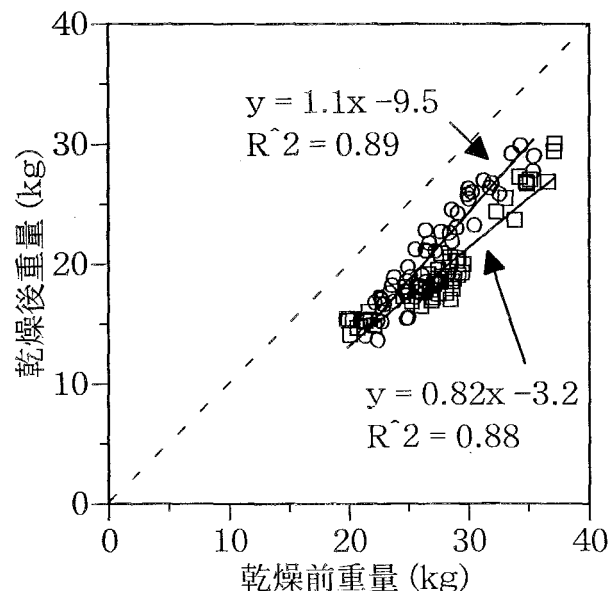


図2-6 スギの正角材と平割材の乾燥前に対する乾燥後の重量  
○：正角材；□：平割材

## 2) 正角材

含水率計を用いて測定した乾燥前含水率と乾燥後含水率の関係を図 2-7 に示す。初期含水率の値に関係なくほぼ均一に乾燥することができた。乾燥前と乾燥後の含水率の頻度分布を図 2-8 に示す。平均含水率は乾燥前の 64% から乾燥後の 19% へと十分低下し、含水率 20% 以下の材が全体に占める割合は 68% であった。このときの乾燥前に対する乾燥後の重量の関係を図 2.9 に示す。乾燥前重量が 30kg 以下の材については、乾燥後の含水率は 15 ～ 20% の範囲に抑えられたが、乾燥前重量が 30kg 以上の材については、仕上がり含水率のばらつきが大きかった。このことは、高周波・熱気複合乾燥法をスギ正角材に適用する場合においても、乾燥に先立って重量による分別が必要であることを示している。

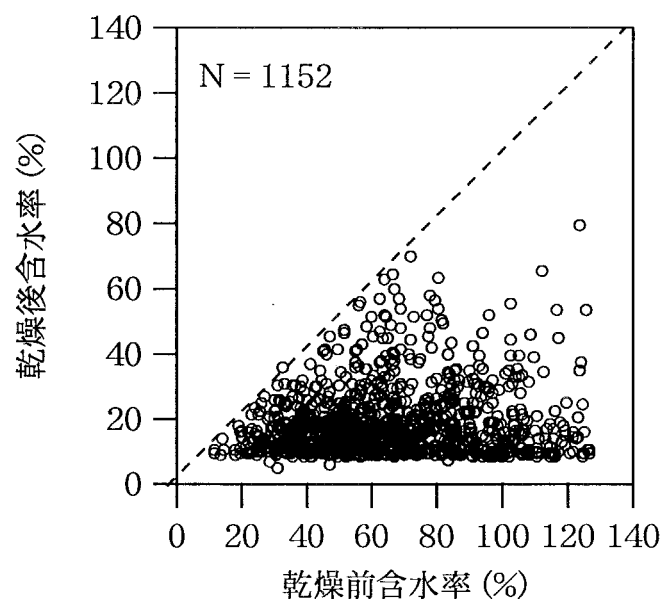


図2-7 乾燥前含水率と乾燥後含水率の関係  
(含水率計による測定)

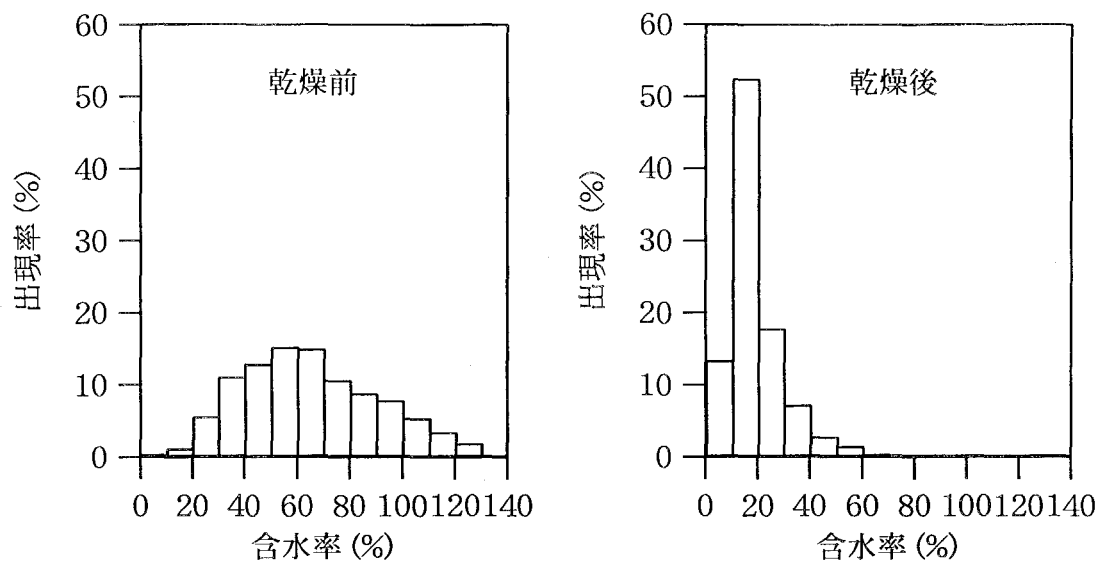


図2-8 乾燥前と乾燥後の含水率の頻度分布  
(含水率計による測定)

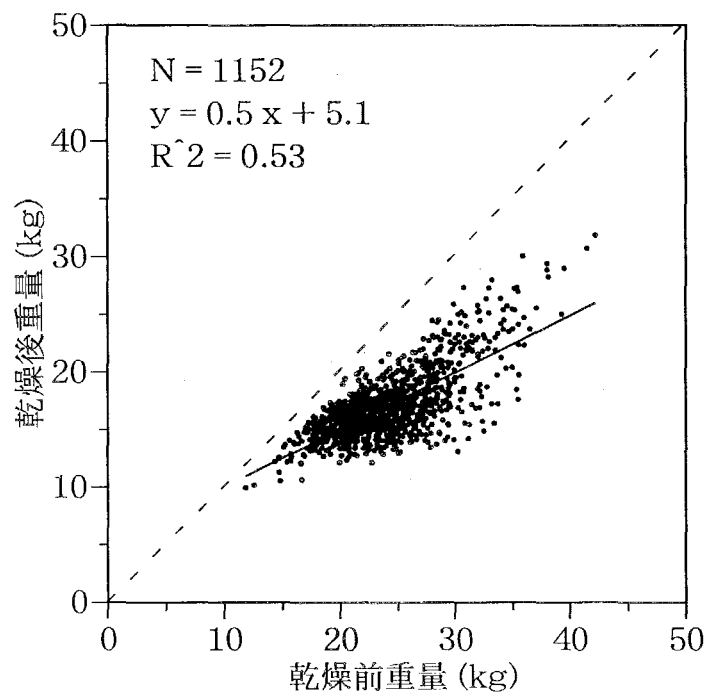


図2-9 スギ正角材の乾燥前と乾燥後の重量

重量分別が乾燥に及ぼす効果を確認するために、重量級、中量級および軽量級のそれぞれ2ロットずつの計6ロットに分別した正角材384本を同時に乾燥したときの、重量分別が乾燥に及ぼす効果を図2-10に示す。乾燥前の生材重量の分布は、ロット間でかなり異なっていたが、60時間の高周波・熱気複合乾燥を施した結果、ロット間の重量分布はほぼ等しくなった。このときのロット別の高周波投下エネルギー量の割合は、重量級、中量級および軽量級に対してそれぞれ50、30および20%であり、含有水分量に応じてエネルギー投下量が異なっていた。重量によるロット分別を行うと、乾燥仕上がり含水率のばらつきを抑えることが可能であり、また、ロット単位でサイクル加熱を行うと、投下エネルギー量を抑えることが可能である。

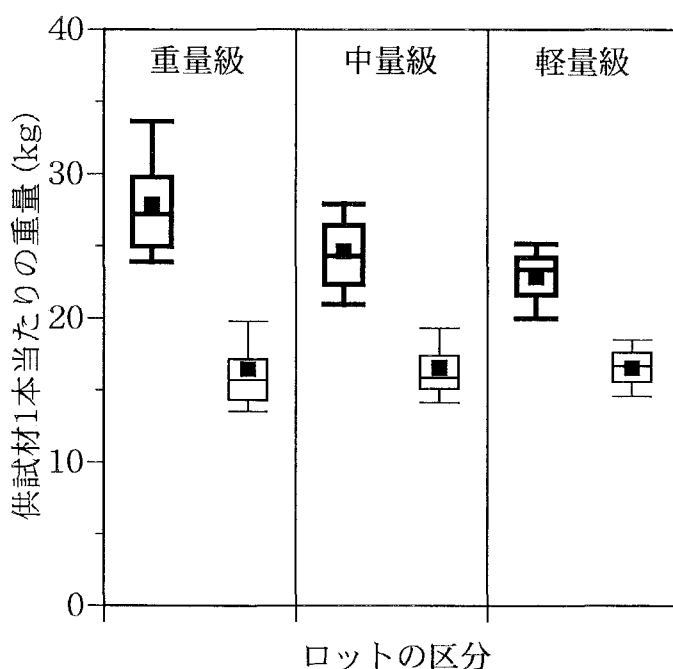


図2-10 重量分別が乾燥に及ぼす効果

太線：乾燥前；細線：乾燥後；■：平均値

箱ヒゲ図は10、25、50、75および90%目の各パーセンタイルを表す

乾燥時間が36時間 (a) と96時間 (b) の2つの実験における、乾燥前後の材内の含水率分布を図2-11に示す。2つの例とも乾燥前の含水率分布は、心材含水率が高い典型的なスギ心持ち正角材の傾向を示していた。図2-11aの材は、材内の最大含水率が91%であるが、36時間の高周波・熱気複合乾燥で、含水率は9～12%の範囲に収まっていた。図2-11bの材は、生材時の材内の最大含水率は140%であった。95時間の乾燥で含水率は7～8%の範囲に収まった。これらの結果から、スギ正角材の高周波・熱気複合乾燥について、以下のことが明らかになった。すなわち、①伐採直後の生材状態から含水率15%までの乾燥所要期間は、熱気乾燥法のその2～3週間<sup>21)</sup>に比較して著しく短いこと、②材内の含水率は、表層から中心まで約10%で均一に仕上がっていること、③しかも、熱気乾燥法あるいは高温乾燥法でしばしば観察される表面割れおよび内部割れが発生しないことが特徴である。

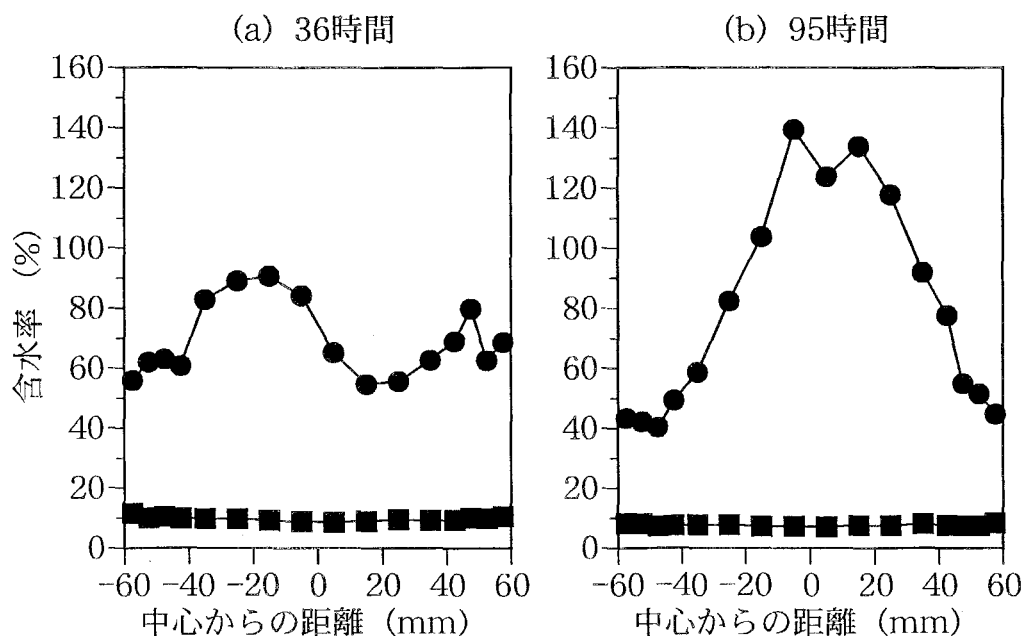


図2-11 乾燥前後における横断面内の含水率分布  
●：乾燥前，■：乾燥後

高周波・熱気複合乾燥では、被乾燥材をべた積みし、熱風が材の縦方向に循環する形式を採用している。栈木を用いずにべた積みする方式では、水平方向と垂直方向との間に材内の含水率分布の違いが生じることが予想される。図2-12に、仕上がり含水率が低い材から高い材までを4区分して、それらの両方向の含水率分布を示す。仕上がり含水率が高いグループ（平均含水率60～80%）では、垂直方向の含水率が、水平方向のそれに比べてわずかに高いが、平均含水率60%以下の仕上がり含水率が低いグループでは、両者の間に差は認められない。このことは、乾燥が進行する過程において、べた積みをした2材面間に存在する隙間を通して、水蒸気が外部へ押し出されたことを示している。

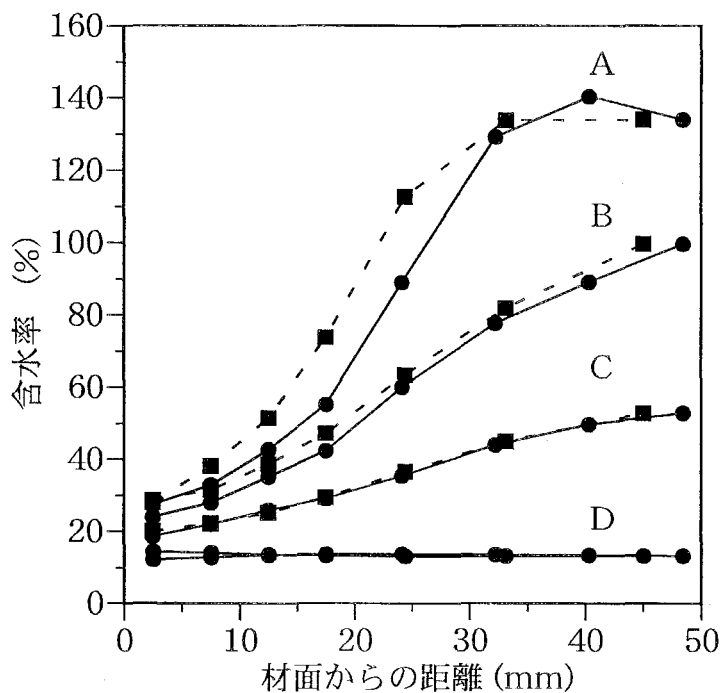


図2-12 水平方向と垂直方向における含水率分布

A：仕上がり含水率が60～80%の材

B：仕上がり含水率が40～60%の材

C：仕上がり含水率が20～40%の材

D：仕上がり含水率が0～20%の材

●：水平方向，■：垂直方向

図 2-13 に、材の中央部と木口から 50cm 離れた位置との含水率を比較している。含水率 20 ～ 40% の範囲でばらつきが見られるが、有意差は認められない。含水率 20% 以下に乾燥されると、繊維方向の含水率が均一化されたことを示している。このことは、熱風を縦循環する方式を採用している本装置が、実用上の問題点を持たないことを示すものである。

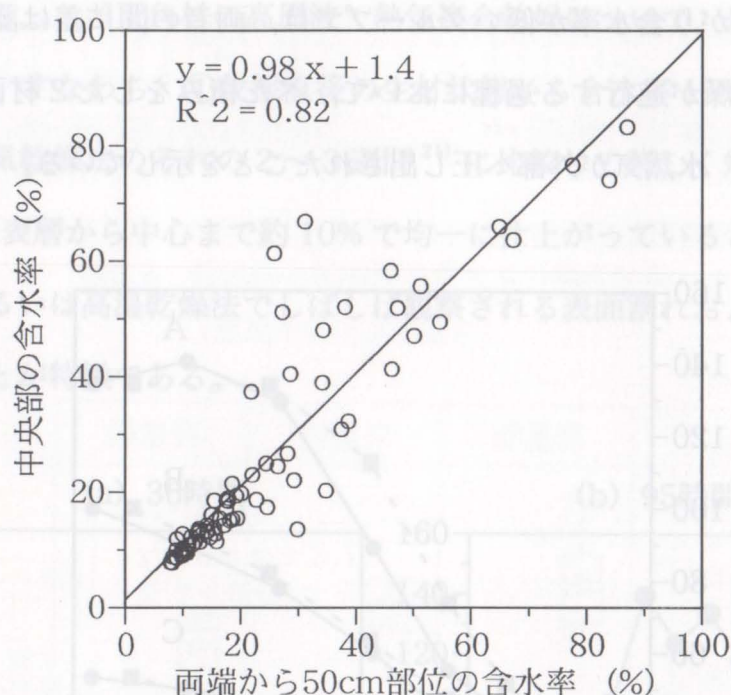


図2-13 木口付近と中央部との含水率の関係

乾燥後の材表面の写真を図 2-14 に示す。スギ心持ち正角材を熱気乾燥すると、ほぼすべての材に表面割れが生じた。高周波・熱気複合乾燥では、少数の材に木口割れと材面割れが生じていたが、その発生割合は 5 ～ 10% であった。高周波による内部加熱と熱気乾燥とを複合させたことによって、材の内部と外部の両方から同時に乾燥が進行して、水分傾斜が小さくなったためであろう。乾燥後の木口および材面を観察すると、図 2-15 に示すような材面の汚染を確認できた。こ

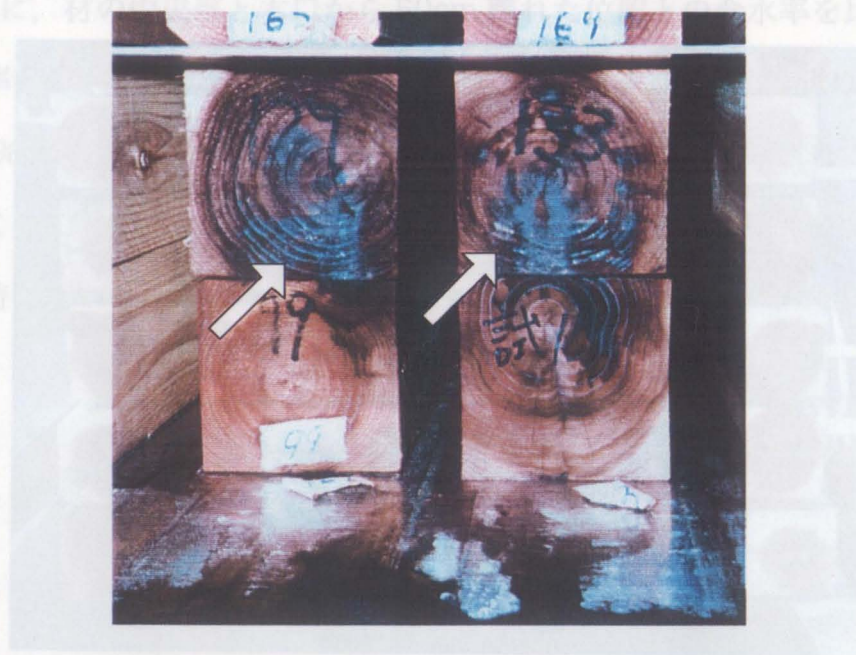


(a) 木口

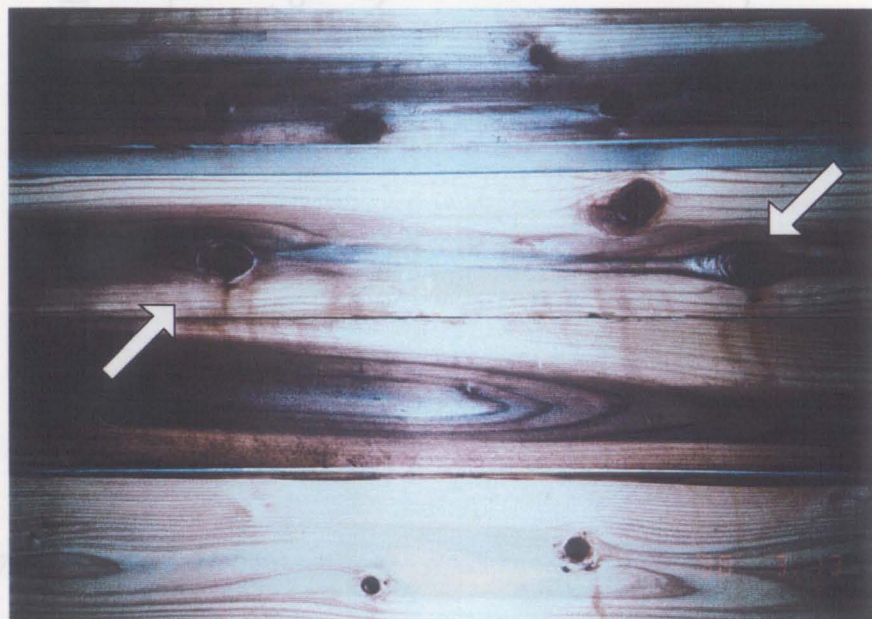
(b) 材面

Figure 1





(a) 木口



(b) 節および材面

図2-15 乾燥後に見られる材面の汚染  
矢印は水分の流出痕を示す。

これらの汚染は、水分通導性の良い木口および節に観察され、材の内部から液相水分が外部へ流出して生じた痕跡と考えられる。この現象と前節のラジアータパイプ材の樹脂流出のケースを考え併せると、高周波・熱気複合乾燥では、材の内部から外部へと水分を押し出すような駆動力が生じていることを示唆している。

### 3) 平角材

乾燥前に対する乾燥後の重量の関係を図 2-16 に示す。平均で 63kg から 42kg へと 21kg の重量減少を示した。このときの供試材 90 本の全乾法による含水率の頻度分布を図 2-17 に示す。186 時間の乾燥で、含水率 20% 以下の材が全体の 99%、含水率 15% 以下の材が全体の 98% を占めていた。含水率 10% 以下の材の出現率が 64% を示して、高い割合であった。JAS あるいは建築基準法などの規格に照らすと、平角材の乾燥仕上がり含水率は、15 ～ 20% が適切であると考えられているので、この場合の乾燥時間（186 時間、約 8 日間）は長すぎたと判定できる。高周波・熱気複合乾燥法をスギ平角材に適用する場合には、材内の含水率分布などについてさらに考察したうえで、乾燥時間の短縮を考慮する必要がある。そこで乾燥後の材内における含水率分布の一例を図 2-18 に示す。生材含水率は 62% であり、材の中心部で約 100% の高い値を示していた。大断面であるほど乾燥は難しいが、この場合の乾燥後の含水率は 11% で、含水率分布は図 2-18 に示すように平準化されていた。この図は、高周波・熱気複合乾燥が、スギ平角材のような大断面で水分透過性の悪い材に対しても効果的であることを示すものである。また、このことは、高周波・熱気複合乾燥によって乾燥された材は、含水率計による水分管理が可能であることを示す例でもある。含水率計で測定した乾燥前に対する乾燥後の含水率を図 2-19 に示す。平均含水率は 53% から 13% に低下し、全体の 90% の材が含水率 20% 以下に収まっていた。高周波式含水率計であっても、その測定値は、材の表層含水率に強い影響を受けるために、大断面材の中心付近の含水率は正確に測定することができない<sup>22)</sup>。この

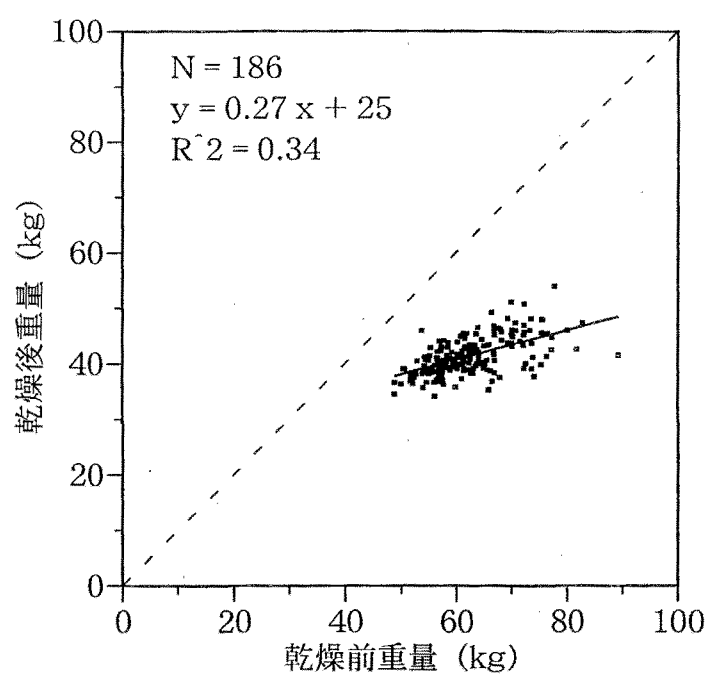


図2-16 スギ平角材の乾燥前に対する乾燥後の重量

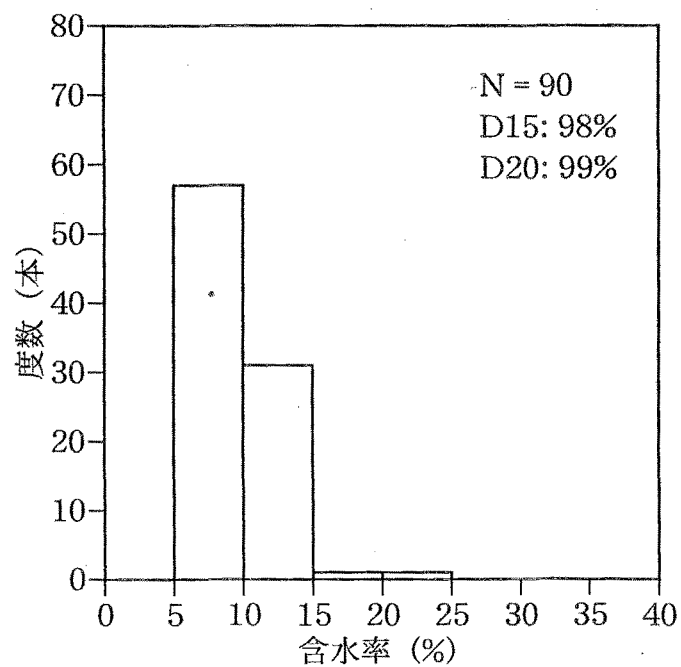


図2-17 乾燥後含水率の頻度分布  
(全乾法による測定；平均含水率は10.0%)



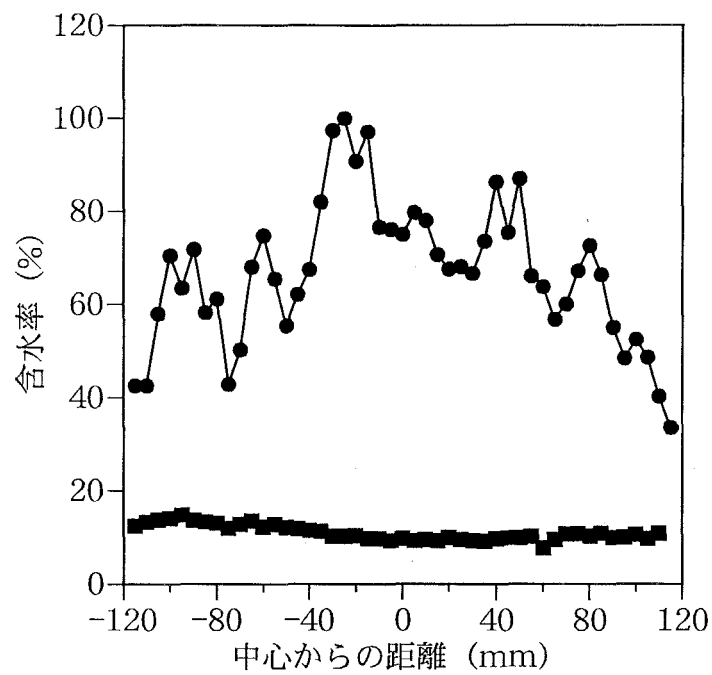


図2-18 スギ平角材の横断面内における含水率分布  
●：乾燥前；■：乾燥後

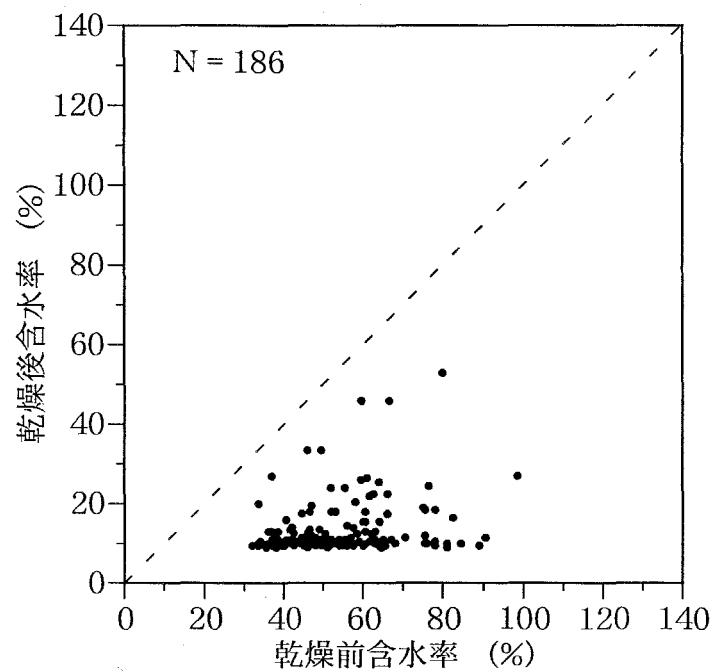


図2-19 乾燥前に対する乾燥後の含水率  
(含水率計による測定)

実験の結果では、全乾法の含水率 10% に対し、含水率計のそれは 13% であり、両者の測定値に大きな差は見られなかった。このことは、高周波・熱気複合乾燥で乾燥した材は、含水率計によって水分管理が可能であることを示すものである。

## 2. 4 乾燥エネルギーコストの試算

本節では、前節の実験結果に基づいて、実用試験の乾燥コストを試算し、また、水分除去に要するエネルギー消費量について検討する。

### 2. 4. 1 実験方法

前節の実験では、実用乾燥装置が消費した蒸気量と電力量を測定した。蒸気コストについては、流量計から得られた蒸気消費量とボイラー効率とから重油消費量を算出し、蒸気コストに換算した。電気コストについては、乾燥装置の制御盤と高周波発振機のそれぞれに取り付けられた電力量計の値を電気コストに換算した。蒸気および電気のそれぞれのコストは、重油価格を 30 円 / l、ボイラーの蒸気生産効率を 0.08 l/kg、電気料金を 16 円 / kWh の条件で計算した。また、飽和蒸気 1kg を生産するのに要する熱エネルギーは、水の気化熱を 539kcal (2.26MJ) として計算した。

### 2. 4. 2 結果と考察

各種の実用乾燥法によるスギ心持ち正角材の乾燥ランニングコストについては、久田がまとめている<sup>23)</sup>。ここでは、高周波・熱気複合乾燥のランニングコストを乾燥に要するエネルギーの観点から詳細に検討して論じる。蒸気および電力の消費量とランニングコストの内訳の一例を表 2-1 に、消費量をエネルギーとして表したものを表 2-2 に、それぞれ示す。高周波・熱気複合乾燥の特徴は、全

表2-1 ランニングコスト

区 分		消費量	コスト (円)	コスト比 (%)
蒸 気	乾 燥	1593kg	3820	5
	蒸 煮	998kg	2400	3
	計	2591kg	6220	8
電 気	高周波	3842kWh	61440	81
	ファン, 制御盤	540kWh	8640	11
	計	4382kWh	70080	92
計	トータル		76300	100
	コスト/m <sup>3</sup>		5020	

表2-2 エネルギー消費量

区 分		消費量	エネルギー量 (GJ)	エネルギー比 (%)
蒸 気	乾 燥	1593kg	3.6	17
	蒸 煮	998kg	2.3	11
	計	2591kg	5.9	27
電 気	高周波	3842kWh	13.8	64
	ファン, 制御盤	540kWh	1.9	9
	計	4382kWh	15.8	73
計			21.7	100

エネルギー消費量に対する電気エネルギーの割合が60～70%と高いことがわかる。その中でも、高周波加熱に消費されるエネルギーは全体の64%であった。しかし、そのすべてが投下エネルギーとなるわけではない。電力消費量に高周波発振機の発振効率0.45～0.5を乗じたものが、投下エネルギー量となる<sup>24)</sup>。したがって、投下エネルギーの観点から見ると、乾燥のために投下される熱エネルギーは、蒸気と電気ではほぼ同等である。しかし、我が国の電気料金は高いので、全乾燥コストに占める電気コストの割合が80～90%を占めていた。この例における単位材積当たりの乾燥コストは5,020円であるが、この値は、初期含水率と仕上がり含水率によって変化する。多くの実験結果から、11.5cm スギ心持ち正角材を、含水率20%以下まで高周波・熱気複合乾燥したときの乾燥コストは、5000～5800円/m<sup>3</sup>であった。ここで、乾燥方式別のランニングコストを表2-3に示す<sup>23)</sup>。高周波真空乾燥法におけるランニングコストは、他の乾燥法に比べて著しく高いが、熱気乾燥を組み合わせることによって、同等の乾燥速度で、乾燥コストを約半分に抑えることができた。高周波加熱に要した1ロット(正角材64本)当たりの電力消費量と重量減少量との関係を図2-20に、乾燥時間

表2-3 乾燥方式別のランニングコストの比較<sup>23)</sup>  
(スギ心持ち柱材, 10.5cm仕上げ, 含水率20%以下まで)

乾燥方式	乾燥温度 (℃)	乾燥日数 (日)	コスト (円/m <sup>3</sup> )
熱気乾燥	70-80	14	3580
高温乾燥	100-120	5	3000
高周波・真空乾燥	50-60	3	10700
高周波・熱気複合乾燥	80-90	3	5230

と重量減少量との関係を図 2-21 にそれぞれ示す。高周波加熱の電力消費量と重量減少量との間の決定係数は 0.54 であり、高い相関が認められる。一方、乾燥時間と重量減少量との間に相関は認められない。同一の条件であれば、乾燥時間が長いほど重量減少量が大きくなるが、6 ロットが同時に収容されてサイクル加熱されるので、投下エネルギーはロットごとに異なる。これらの結果は、高周波・熱気複合乾燥における乾燥の主体が高周波加熱であること、水 1kg を除去するために約 1.2kWh の電力量を消費したことを示している。材の重量と全乾比重あるいは含水率があらかじめわかっているならば、この値を用いて、仕上がり含水率を得るために必要な投下エネルギーを大略計算できる。

以上の結果を踏まえ、高周波・熱気複合乾燥における高周波加熱の投下エネルギーについて考察する。ここで、発振効率を 0.5 とすると、投下エネルギーは 0.6kWh (2.16MJ) となり、水の気化熱 539kcal (2.26MJ) より低いエネルギー

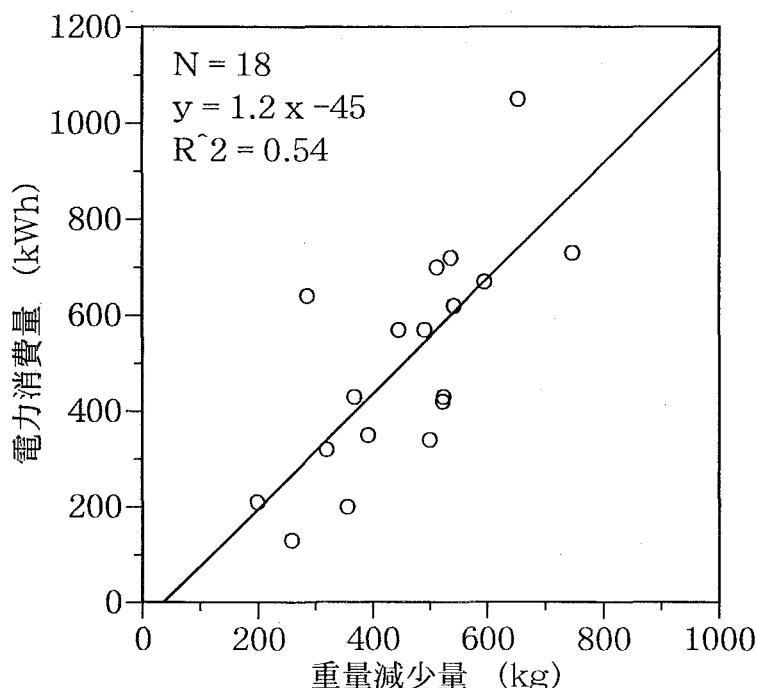


図2-20 高周波加熱に要した電力消費量と重量減少量



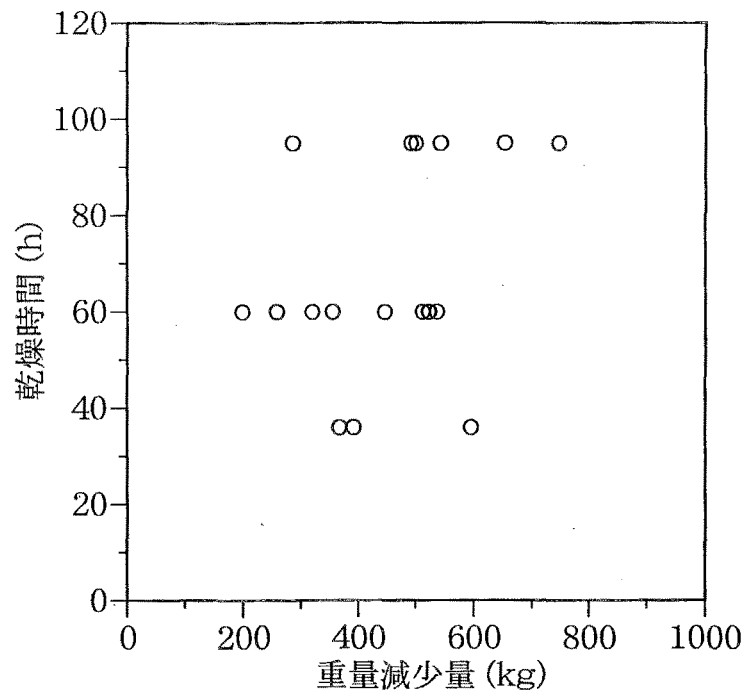


図2-21 乾燥時間と重量減少量

一で乾燥されたことになる。また、高周波乾燥では、1kgの水分を蒸発するために、繊維飽和点以上で1kWh (3.6MJ)、繊維飽和点以下で1.5kWh (5.4MJ) のエネルギーが必要である<sup>25)</sup>。高周波加熱による投下エネルギーが小さい原因としては、蒸気によってある程度のエネルギーが供給されたこと、熱気乾燥によって水分が蒸発したこと、液相水分で材外に流出する水分のための気化熱が不要であることなどが考えられる。これらの結果から、高周波加熱に熱気乾燥を組み合わせたことで、木材中の水分除去が低コストで行われたと考えられる。

## 2. 5 要 約

本章では、高周波・熱気複合乾燥法の実用性を検証するために、実用乾燥装置を異なる樹種と材種とに用い、乾燥特性を検討した。結果を要約すると以下のと

おりである。

- 1) 被乾燥材を重量で分別してロットに分け、高周波でサイクル加熱することによって投下エネルギー量を抑制できた。また、水分特性、乾燥特性あるいは樹種、材種の異なるスギ材とヒノキ材の混載乾燥が可能であった。
- 2) ラジアータパイン材のような樹脂を多く含んだ材を高周波・熱気複合乾燥すると、樹脂の著しい滲出が観察された。
- 3) ベタ積みを行っても、乾燥は適切に進行し、かつ、材の厚さ方向に含水率分布の差は認められなかった。また、材の長さ方向に含水率の差は認められなかった。
- 4) 正角材および平角材のような大断面材であっても、乾燥に先立って重量分別を行うことで、水分量に応じた高周波加熱が行われ、乾燥後の含水率のばらつきを抑えることができた。また、表面から中心まで均一化された含水率分布が得られた。
- 5) 乾燥後の木口割れおよび材面割れの発生割合は5～10%であった。
- 6) 含水率分布が均一化されたため、含水率計による含水率値と全乾法のそれとが近い値をした。このことから、高周波・熱気複合乾燥した材は、含水率計による評価が可能であることが明らかになった。
- 7) 11.5cm スギ心持ち正角材の乾燥において、高周波真空乾燥法と比較すると、乾燥速度は同等で、ランニングコストは約半分の5000～5800円/m<sup>3</sup>であった。
- 8) 生材から含水率20%以下まで乾燥したときの、水1kgを除去するための電力消費量は、約1.2kWhであった。

### 第3章 高周波・熱気複合乾燥における水分移動の駆動力

高周波・熱気複合乾燥法によってスギ正角材を乾燥すると、従来の熱気乾燥法に比べて乾燥が急速で、均一な含水率分布が得られることを前章で示した。この結果は、高周波・熱気複合乾燥における水分移動の駆動力が、従来の熱気乾燥とは異なる可能性を示している。このことを実証するために、本章では、高周波・熱気複合乾燥における水分移動の駆動力について考察する。

3. 1 では、スギ正角材を高周波・熱気複合乾燥した場合における含水率分布の推移について、3. 2 では、高周波・熱気複合乾燥における高周波加熱の関与について、3. 3 では、高周波加熱のみによる正角材からの水分流出量と水分移動の方向について、3. 4 では、水分移動における材内圧力の関与について、それぞれ検討する。

#### 3. 1 含水率分布の推移

前章では、高周波・熱気複合乾燥によって材内の含水率分布が平準化されることを示したが、どのような推移で平準化に至るのかは明らかにされてはいない。

本節では、高周波・熱気複合乾燥過程の含水率分布の推移を調べることにより、水分移動の駆動力について考察する。

##### 3. 1. 1 実験方法

長さ約 5m、直径約 25cm の伐採直後のスギ丸太から、長さが約 4m で辺長が 12cm の心持ち正角材を製材した。可能な限り偏心を避け、背割りは施していない。これを図 3-1 に示すように、1 本の製材から長さが 1m の試験材 4 本と、厚さ 3cm の含水率分布測定用試験片 5 個を切り出した。含水率分布測定用試験片

については、髓を含む直交する 2 方向に、表層の 2cm は 5mm ずつ、それより内側は 1cm ずつに分割した。含水率の決定は全乾法によった。

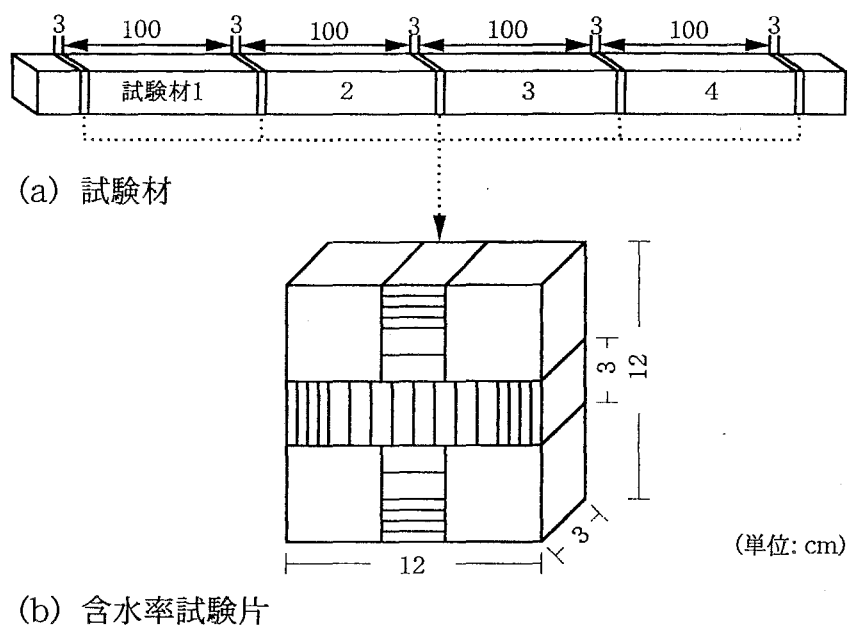


図3-1 供試材の分割方法

小型の高周波・熱気複合乾燥装置および試験材の収容方法を図 3-2 に示す。高周波・熱気複合乾燥装置は、熱気乾燥装置（住金ヒルデブランド製）に、高周波発振機（富士電波工機製、発振周波数 13.56MHz、定格出力 35kW）を組み込んでおり、常圧下で高周波加熱と熱気乾燥とが同時に行える。試験材を、この装置の印加電極板と接地電極板との間に、栈木を用いないでべた積みとし、垂直方向に 4 段積みし、それらを水平方向に 9 列に配置した。したがって、電極板間の距離は 48cm である。空気の循環通路として設けた水平方向の列間隔は約 6cm である。したがって、循環空気は試験材の長さ方向に沿って流れる。最後尾の列（9 列目）は温度センサー挿入用試験材の列として、4 段に積んだ供試材のそれぞれの中心温度を測定するとともに、上から 2 段目の供試材によって高

周波加熱温度を制御した。高周波電界中における試験材の材内温度は、長さの中央部で厚さの中心、中間部および表層に達するように、3ヶ所に直径約2mmの小孔（材表面からの深さはそれぞれ、6cm、3cm および 1cm）を穿孔した。これらの小孔に光ファイバー温度計を挿入して測定し、中心温度 101℃で高周波発振機を ON-OFF 制御した。

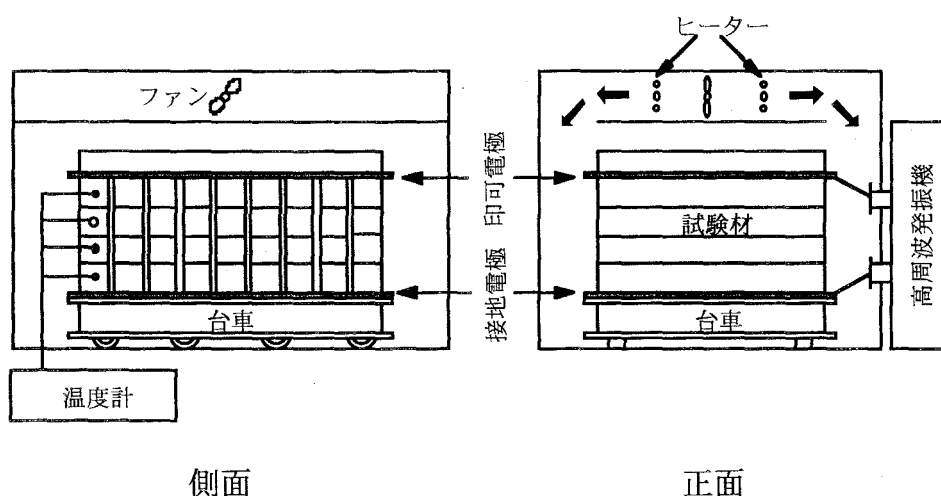


図3-2 乾燥装置の構造と試験材の配置

乾燥実験は 13 回行い、各回とも生材含水率が約 80～200%の範囲の試験材 36 本を用いた。1 回の収容材積は 0.518m<sup>3</sup>であった。実験に供した乾燥条件を表 3-1 に示す。

乾燥過程において、含水率と含水率分布との推移を測定した。同一丸太から得た長さ方向に連続する 4 本の試験材のうち、乾燥開始から時間 6 時間ごとに 1 本づつを乾燥装置から取り出し、直ちに重量を測定して含水率を求めた。また、その試験材の中央部から含水率分布測定用試験片を切り出して、各時間ごとの含水率分布を求めた。したがって、試験材は 6 時間ごとに破壊されるので、乾燥

経過と含水率分布の推移は、同一丸太ではあるが個体が異なる正角材から求められている。

表3-1 高周波・熱気複合乾燥の乾燥条件

時間 (h)	温度(℃)		
	高周波	熱気	
		乾球	湿球
0-6	101	80	80
6-12	101	80	76
12-18	101	80	74
18-24	101	80	71

### 3. 1. 2 結果と考察

高周波・熱気複合乾燥過程のスギ正角材の中心，表層および中間部の温度推移を図 3-3 に示す。製材直後の生材で，含水率が表層で約 150%以上，中心部で 200%以上を示すスギ正角材に，乾球温度 80℃の熱気乾燥条件下で高周波が印加されると，乾燥初期には，表層，中間部および中心の温度が上昇を開始した。表層温度がまず目標温度の 80℃に達した。高周波加熱開始から 1～2 時間後に中心温度が 101℃に達するころには，中間部の温度も 80℃以上に達していて，材内には中心から表層に向かって低下する温度傾斜が形成された。高周波を木材に印加すると，断面の大きさが供試した正角材程度ならば木材はほぼ均一に加熱されるはずであるが，熱気乾燥の乾球温度を 80℃としながら高周波加熱で中心温度を

101℃に制御すると、中間部温度は乾燥初期には約 87℃を維持し、表層温度は、乾球温度および湿球温度のいずれよりも高い約 85℃の温度を乾燥終了まで維持した。しかし、微視的には表層温度は、乾湿球温度差が大きくなる乾燥後期に激しく変動し、急速な低下と上昇を繰り返していた。

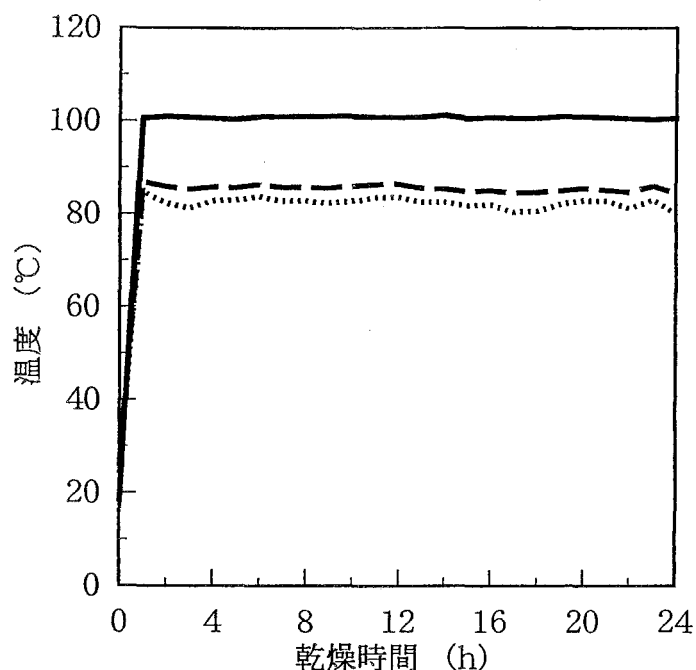


図3-3 高周波・熱気複合乾燥過程における材内温度の推移

—— 中心    - - - 中間    ..... 表層

材内に温度傾斜が生じ、しかも表層温度が熱気乾燥の乾球および湿球温度よりも終始高かった。内部から表層に向かう熱エネルギーの移動が存在することを示している。この場合のエネルギー運搬要素は、木材中の水分あるいは木材実質を介する熱伝導の他に、乾燥初期には材内部からの自由水の流動、乾燥が進行した乾燥中期以降では、木材内部と表層との間の蒸気圧差を駆動力とする水蒸気の移動が考えられる。

乾燥中期にいたると、中間部温度が徐々に上昇して中心温度にほぼ等しくなったが、表層温度は外周条件の乾球温度よりもやや高い温度を維持し続け、この段階でも木材内部から表層へ熱エネルギーが移動したことを示している。

通常の熱気乾燥の場合、内部水分の表層への移動量が、表面からの水分蒸散量に追従できなくなると、表層が急速に繊維飽和点以下になって中心付近との間に大きな水分傾斜ができ<sup>2)</sup>、早い時期に表層温度は乾球温度近くなるのが、スギ正角材の一般的な乾燥経過である。高周波・熱気複合乾燥で材中心の温度を 101℃ に加熱すると、図 3-3 に示すように、中心温度は中間部や表層のそれよりも高くなるので、材中心ほど蒸気圧が高くなって、両者の間に蒸気圧差が生じていると考えられる。このような材内の温度と圧力との状況は、熱気乾燥のそれとは異なり、内部加熱の特徴である。

表層含水率が約 150%、中心部のそれが約 200%で、乾燥前の水分傾斜が比較的小さな高含水率のスギ心持ち正角材の、高周波・熱気複合乾燥過程の含水率分布の推移を図 3-4 に示す。注目すべきことは、乾燥開始 6 時間後には、すでに中心付近の含水率が中間部のそれよりも低い値を示していることである。一方、中間部では、含水率は乾燥前とほぼ同じか、わずかの低下にとどまっていた。このときの平均含水率は 100%以上で、表層含水率が繊維飽和点以上を示していることは、材内部から表層への水分供給が盛んに行われていることを表している。乾燥開始後 6 時間の時点では、表層には中間部からの自由水の供給が行われる一方、中間部には中心付近からの盛んな水分供給がなされている水分移動の機構を想定することができる。

水分を含んだ木材に高周波が印加されると、高周波は主として吸着水および自由水に吸収されて発熱し、内部の蒸気圧が上昇して、内部水分の外部への移動現象が生じる<sup>26)</sup>。したがって、この場合にも、高周波容量の大きい高含水率部分の発熱が進んで、蒸気圧が上昇し、その部分の水分は外部へ向かって移動する。



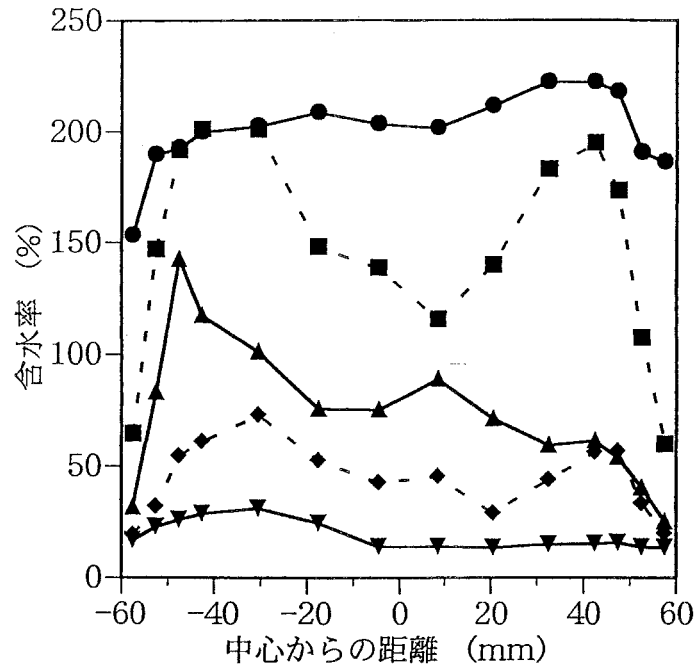


図3-4 高周波・熱気複合乾燥過程における含水率分布の推移

●：乾燥前，■：6時間後，▲：12時間後，  
◆：18時間後，▼：24時間後

そのために、次の乾燥過程、すなわち、6 時間後から 12 時間後までの間には、中間部の含水率が低下し、水分傾斜は平準化の傾向を示すことが、図 3-4 から推察できる。この過程でも、中心含水率の増加は見られないことから、中間部に存在した水分は表層側に移動して、表面から流出あるいは蒸散したことが示唆される。このように高周波・熱気複合乾燥では、横断面内の含水率分布は M 字型化と平準化とを交互に繰り返しながら、材全体の乾燥が進行することがわかる。この点が熱気乾燥における含水率分布の推移と異なっている。

以上のことから、高周波加熱しながら同時に熱気乾燥を行うと、木材中の内部水分は、主として次の 2 つの駆動力によって表層へと移動して、木材から除去されると考えられる。その 1 つは、中心温度の上昇による蒸気圧の上昇である。スギ心材および移行材では、壁孔閉鎖や細胞内容物の沈着などで気体透過性は悪

く、正角材ほどの大きな断面になると、中心付近は半密閉状態にあると考えられる。このような状態にある高含水率のスギ正角材が、100℃以上に高周波加熱されると、中心付近の水分は100℃の飽和水蒸気に相転移して、半密閉状態にあるスギ正角材の中心付近の蒸気圧が上昇する。そのために、中心付近とその周囲との間に蒸気圧差が生じ、それが駆動力となって、水分は表層へと移動する機構である。多量の自由水が存在する乾燥初期に、木口や節から液相水分の流出が観察されたことは、この機構が想定できることを裏付けている。他の1つは、上記の蒸気圧差による内部から表層への水分移動と、同時平行的に進行する熱気乾燥による表面からの水分蒸散である。乾燥末期に近づいて、材内に十分な自由水が存在しなくなると、水分は水蒸気の形で、温度が高くて蒸気圧の高い内部から、それらが低い表層へと移動し、熱気乾燥によって表面から蒸散する。このことは、図3-4において、乾燥末期に至るまで最表層5mmの含水率が約20%と、乾燥条件に対する平衡含水率(8.7%)よりも著しく高い値を示すことから理解される。

このような水分移動の機構は、高周波真空乾燥のそれと類似している。心材の水分透過性が悪いうえに、生材含水率が高いスギ正角材に、高周波・熱気複合乾燥法を適用したときの特徴は、高含水率領域の水分移動の駆動力として前者の寄与が大きく現れる点である。

### 3. 2 高周波加熱の関与

前節では、高周波・熱気複合乾燥過程において確認された特徴的な含水率分布は、材内温度の上昇に伴う蒸気圧の上昇が、水分移動の駆動力となって形成された可能性があることを述べた。

本節では、材内の温度、圧力および水分状態の推移から、高周波加熱が材内水

分の移動に果たす役割を検討する。

### 3. 2. 1 実験方法

長さ約 3.65m で、辺長が 12cm の、製材直後のスギ心去り正角材 3 体を用いた。それぞれから、図 3-5 に示すように、長さが約 1m の試験材 3 本を採取した。関連する一連の実験には、同一正角材から採取した連続する 3 本の試験材を使用するように組み合わせ、1 実験につき 1 本ずつ供試した。試験材の両端から繊維方向の長さが 3cm の含水率測定用試験片を 1 枚ずつ合計 4 枚を採取し、表層から中心まで 5mm 間隔で分割して、全乾法により含水率と含水率分布を測定した。

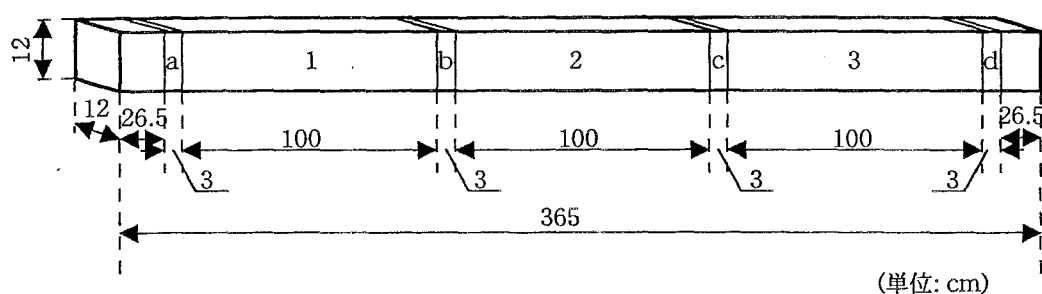
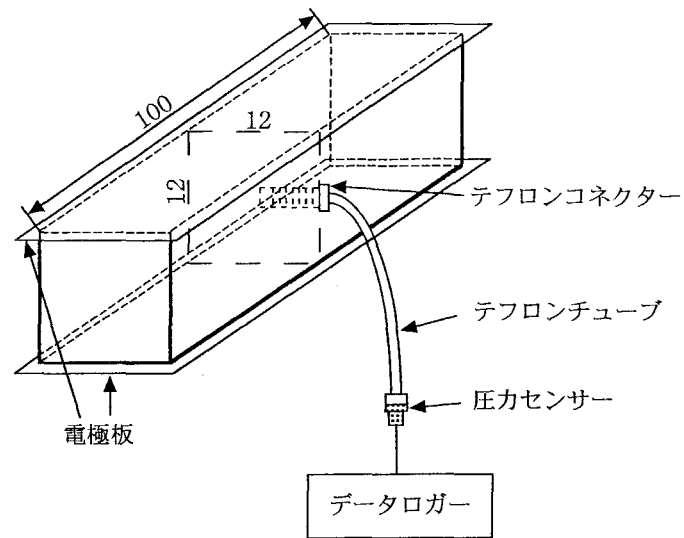


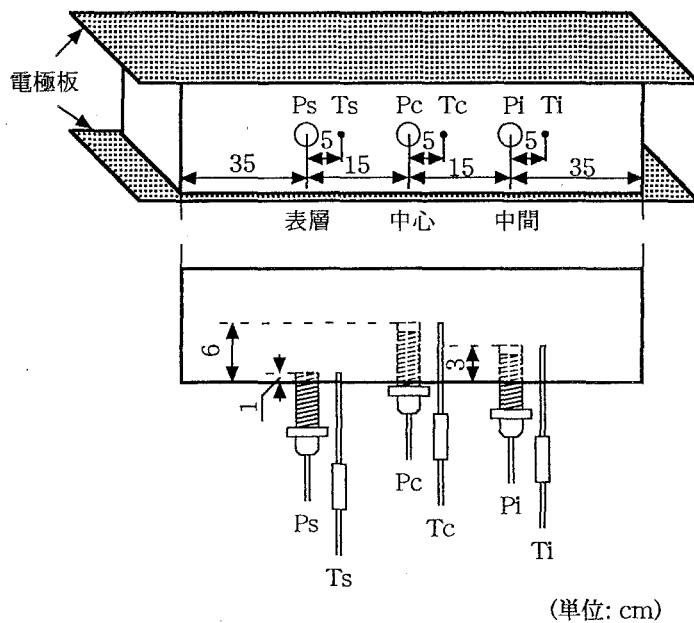
図3-5 供試材の分割方法

上記の試験材を 1 本ずつアルミニウム電極板間に挟み、発振周波数が 6.78MHz, 定格出力が 6kW の高周波発振機を用いて、常温常圧下で高周波加熱した。このとき、試験材の長さ方向の中央部の断面中心の温度を指標として、高周波発振を ON-OFF し、材温を 101, 120 あるいは 140℃で制御した。

高周波加熱過程の半径方向および繊維方向における材内温度と材内圧力を測定した。材内圧力は、木口からの距離が 5, 10, 20 および 50cm (長さの中央) の各部分において、図 3-6 に示すように正角材横断面の中心 (表面からの距離



(a) 材内圧力の測定方法



(b) 温度計および圧力センサーの位置

図3-6 材内温度および材内圧力の測定方法

Tc, Ti, Ts: 中心, 中間および表層の材内温度

Pc, Pi, Ps: 中心, 中間および表層の材内圧力

が 6cm。Tc および Pc)、中間部 (同 3cm。Ti および Pi) および表層 (同 1cm。Ts および Ps) まで、それぞれ達する直径 1.5cm の小孔を穿孔した。それらに圧力センサー (共和電業製 PH-10KB) を挿入して測定した。このとき、圧力センサー用コネクタのねじ部分にシールテープを巻いた上からシリコンコーキング剤を塗布して、小孔にしっかりとねじ込んだ。材内温度は、圧力センサーから繊維方向に約 5cm 離れた部分に、直径 3mm の小孔を圧力測定用小孔と同じ深さまで穿孔して、光ファイバー温度計を挿入して測定した。温度計の挿入孔にあらかじめシリコンコーキング剤を詰めたうえで温度計を挿入し、さらに挿入部をシリコンコーキング剤で外部から密封した。材内温度と材内圧力の測定に先立って、圧力測定ラインに圧力既知の窒素ガスを通しつつ、測定ラインを水中に浸漬して、圧力漏れのないことを確認した。また、試験材と温度計および圧力センサー用コネクタとの接続部分に石鹼水溶液を塗布して、測定中に気泡が生じないことを確認した。

高周波加熱時間の経過および材内温度の推移に伴う含水率と含水率分布の測定を以下の要領で行った。加熱開始から 1 時間が経過した時点、中心温度が 101, 120 あるいは 140℃に達した時点、および、101, 120℃に達した時点から 3 あるいは 7 時間を経過した時点において高周波加熱を停止した。加熱終了後約 4 時間経過して、中心温度が室温より約 10℃高い値まで低下した時点で、長さ 1m の試験材の中央 (図 3-6a に示す破線) 付近から、繊維方向長さ 3cm の含水率測定用試験片を採取して、含水率と、電極板と平行方向の含水率分布を測定した。

### 3. 2. 2 結果と考察

#### 1) 高周波加熱過程の材内圧力と水分の流出

高周波加熱に伴う材内圧力の上昇程度は、スギ正角材の物質透過性によって決定される。ここでは、高周波加熱による含水率低下の大きな材と小さな材とを比

較しながら、材内圧力と材面からの水分流出現象とについて考察する。

含水率低下が小さい試験材の材内圧力推移と、加熱後の含水率分布を図 3-7 に示す。材内圧力は材中心の温度上昇とともに上昇した。すなわち、材内圧力は、中心温度が 80℃に達したところから急速に上昇し始め、高周波加熱開始から約 8 分間で 100℃に達したときに 123kPa に、11 分間で 120℃に達したときには 133kPa に達した。さらに 18 分後に中心温度が 140℃、中間部温度が約 100℃に達すると、材内圧力は最大値（図 3-7a の矢印 1）に達して 276kPa を示した後、最初の圧力降下が観察された。このときの圧力は、その温度に対する飽和蒸気圧よりも低い値である。このことは、材内圧力が木材組織内を通過して外側へと抜けること、あるいは、圧力上昇によって生じた木材中の微細な間隙などを通して漏れていることを示しているものと思われる。

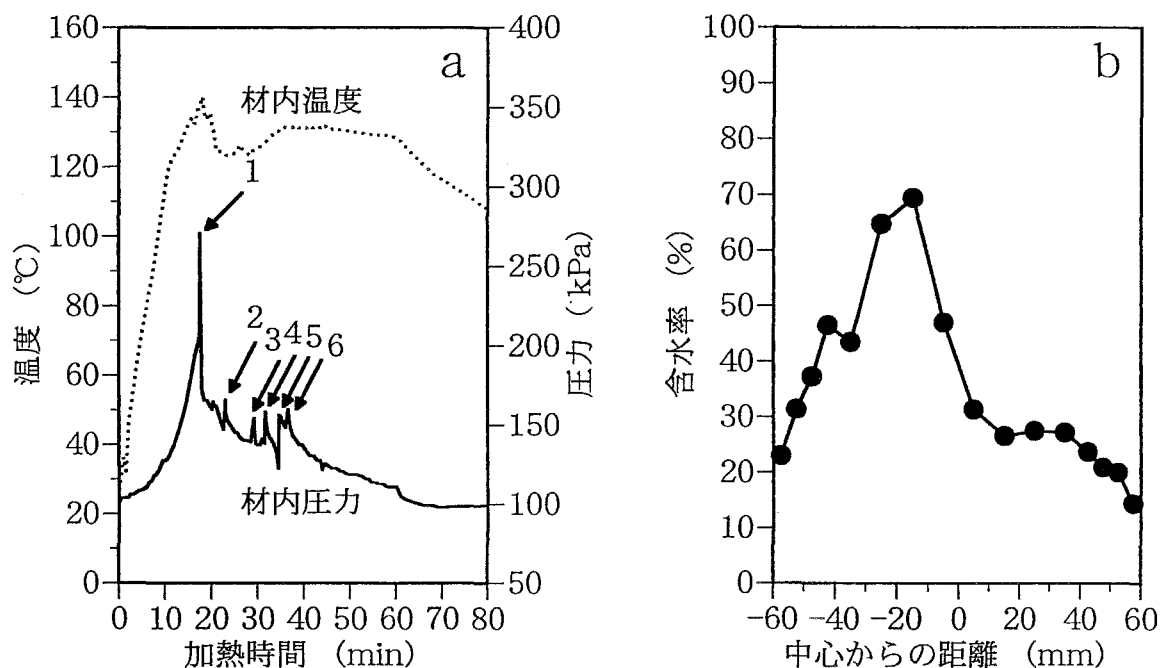


図3-7 含水率の低下が小さい場合の高周波加熱過程の材内温度および材内圧力(a)と加熱後の含水率分布(b)の一例

加熱過程で中心温度が 100℃に達する直前から、木口の中心付近あるいは材側面の節部にまず泡状水分の流出が観察された。その後、材内圧力の上昇とともに、木口および側面の節部からの液相水分の流出へと変化した。したがって、中心温度を 120℃以上に加熱して、材内圧力を高めるほど乾燥速度は大きくなると言える。その後、さらに高周波加熱を継続すると、水分減少による負荷低下のためと思われる陽極電流の低下が生じ、材温と圧力の継続的で緩やかな降下が見られた。しかし、140℃から 120℃への降下過程において、圧力の一時的な上昇と降下が繰り返され、極大値が数次にわたって測定された（図 3-7a）の矢印 2～6）。それぞれの極大値の発生間隔、および絶対値の大きさには一定のパターンは見られなかったが、全体的には緩やかな減少曲線を呈して、材内圧力が低下した。極大値が観察される圧力領域で水分流出が多かったことから考えれば、高周波加熱を 120℃以上で行うと高い乾燥効率を得られる。しかし、この加熱条件を心持ち材に適用すると、髄割れが発生したので、高周波加熱条件についてはさらに詳細に検討されなければならない。

このような圧力推移は、生材含水率が高くて、重量減少量が小さな材にしばしば観察される傾向が見られた。極大値が数次にわたって観察される理由は、以下の 2 つの現象に基づくものと推察された。その 1 つは、圧力通路の開口と閉鎖の繰り返しである。すなわち、最初の圧力上昇によって微細な水分通路が開口し、それに続く圧力降下（矢印 1）でいったん閉鎖されるが、加熱の継続によって再び圧力が上昇すると、その開口部分から圧力が漏れたり、あるいは新たな開口の形成などによって、最初の圧力ピーク値よりも小さな圧力（矢印 2～6）で、再びピークが形成される。内部水分はそれらの開口を経てさらに表層へと移動する機構が想定される。また他の 1 つは、材内水分の減少である。すなわち、最初の圧力降下による開口の閉鎖の後、加熱がさらに継続されると、中心付近には再び圧力上昇が生じるが、その部分の水分はすでに表層へと押し出されて減少してい

ること、また一度開口された通路は二度目にはより小さな圧力で開口されることなどの理由で、圧力値は最初のそれよりも小さくなる機構である。ここに示した例では、圧力の上昇と降下とは小さなものも含めると、十数次にわたって繰り返されており、微細な水分通路の形成によって、内部水分が徐々に表層側へ移動して行く現象が考えられる。材温に対して圧力が低いことは、スギ正角材は完全に密閉された状態ではなく、微細な間隙から圧力が瞬間的に解放されたり、あるいは材内圧力が表層へと漏れて解放されていることを示すものであろう。材表面からの水分流出は約 40 分間ほど継続して、1 時間加熱後には 2.3kg の重量減少が見られた。

加熱終了後の含水率分布の一例を図 3-7b に示す。107.8%の加熱前の含水率は、1 時間加熱後には 57.6%まで低下した。この時の材内各部位における含水率は、長さ方向の中央部の中心と、中間部では約 40%を示して、自由水が存在することを示し、表層部では約 20%を示していた。これは、加熱前後の含水率が比較的高く、到達した最大圧力が 276kPa で、材内圧力の上昇と降下が数次にわたって測定された例（図 3-7a）の場合である。

次に、含水率低下の大きい試験材について考察する。前者と同様の処理を行っても、含水率低下が大きい材では、図 3-8a に示すように極大値の出現回数が少なかった。この場合の 1 時間加熱後の含水率分布は、図 3-8b に示すように中心で低くて約 10%、表層部が最も高くて約 45%、中間部では両者のほぼ平均である約 30%を示した。

以上の実験結果から、高周波・熱気複合乾燥法による乾燥初期における材内水分の移動機構が示唆される。すなわち、温度が最も高い中心付近で蒸気圧がもっとも高くなり、中心付近とその周囲との間に蒸気圧の傾斜が形成される。その結果、中心を取り巻く周囲の水分は、その蒸気圧差を駆動力として、木口方向あるいは材側面方向へ向かって移動し、材面から流出する現象が考えられる。このとき、



材内圧力が数次にわたって極大値に達するために、上記の現象も数次にわたって繰り返される。このことが、材面からの水分流出が長時間にわたって観察される理由であろう。

しかし、乾燥前には微細なヘアクラックとして観察された髄割れが、加熱過程でその幅を広げ、それを通して蒸気の噴出する現象が観察された。加熱終了後の観察で、髄割れは材の長さ方向に中央部まで達していることが確認された。髄割れの幅の拡大あるいは長さ方向への伸長は、乾燥による損傷となるので、実際の乾燥工程では本実験で用いた  $140^{\circ}\text{C}$  までの高温には加熱することはできない。これらのことを考慮すると、 $100\sim 120^{\circ}\text{C}$  が、実用的な高周波加熱条件となるであろう。

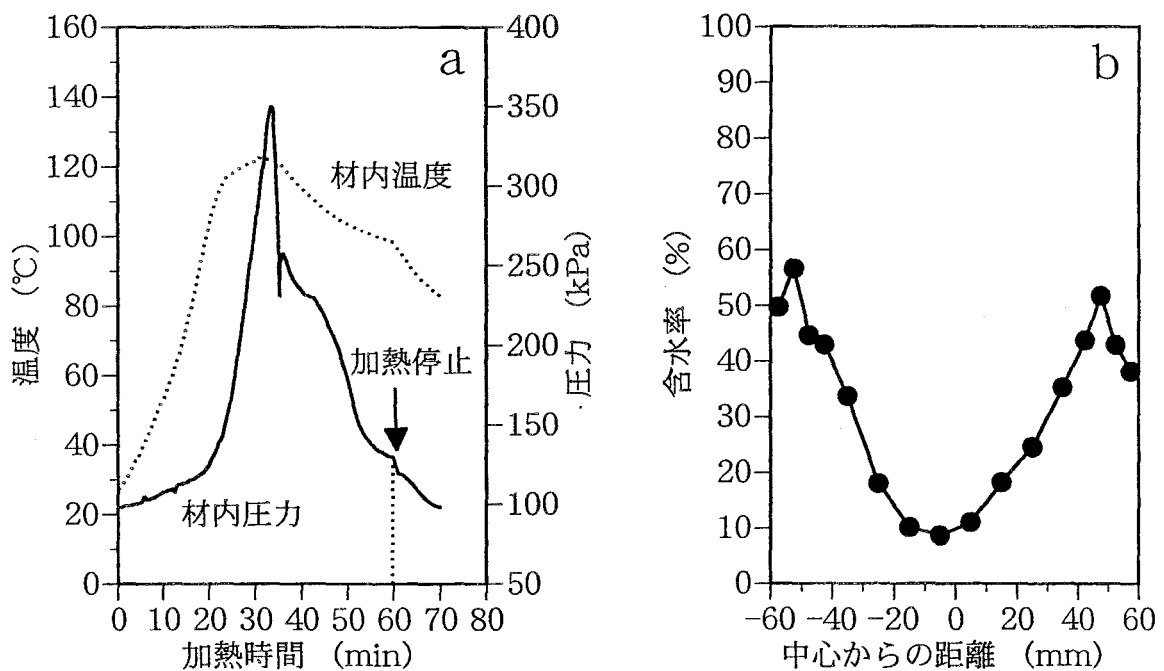


図3-8 含水率の低下が大きい場合の高周波加熱過程の材内温度および材内圧力(a)と加熱後の含水率分布(b)の一例

## 2) 材内の温度および圧力の繊維方向における傾斜

木材の繊維方向の水分透過性は、直角方向のそれに比べて著しく大きい。木口が開放された正角材を高周波加熱するとき、木口に近い部分ほど圧力が漏れ易くて、材内圧力は上昇しにくくなり、木口からの距離によって含水率が異なることが予想できる。実大正角材で木口付近における繊維方向の圧力傾斜が大きいことは、繊維方向に圧力が漏れにくいことを表し、材内の水分移動は、中心から表層へ向かう移動が主体になって、実大正角材でも長さ方向および横方向のいずれにも水分平準化が期待できることを意味している。

木口からの距離が 50cm の中心温度を 120℃で制御したときの、木口からの距離と、材内温度および材内圧力との関係を図 3-9 に示す。各部分の中心温度は加熱開始から急速に上昇し始め、約 20 分後に中央の中心温度が 120℃に達したときに、それぞれの部分も最高温度を示した。これに対して、材内圧力の推移は、木口からの距離によって異なっていた。すなわち、木口から 50cm 部分（中央）と木口から 20cm 部分との材内圧力はほぼ同様の推移を示しつつ上昇し、いずれの部分とも 120℃に達したときに、材内圧力は約 130kPa に達した。その後、加熱の継続とともにほぼ同一の曲線を描きながら徐々に増加して、80 分後には約 160kPa まで上昇した。これに対して、木口から 10cm 部分と 5cm 部分とは、前 2 者に比べて到達圧力が低く、それぞれ約 120kPa と約 100kPa でほぼ常圧に近い材内圧力で終始した。図 3-9 に示される木口からの距離と材内圧力との関係は、木口に近い部分では木口方向への圧力漏れがあることを示唆しており、木口からの距離が 10cm 以下では、材内圧力はほとんど上昇しないことが明らかになった。木口からの距離と材内圧力について、ベイスギ材を 40mmHg の減圧下においたとき、木口から 5cm 離れた部分と 25cm 離れた部分との間に、大きな圧力差が認められていること<sup>27)</sup>、あるいは、高周波減圧乾燥下のベイツ材において、木口から 10cm 部分のそれが、50cm 部分と比べて著しく低いこ

と<sup>28)</sup>が示されている。繊維方向の浸透性は、繊維に直角方向のその 100～10000 倍とされる<sup>5)</sup>ことから考えても、この部分の材内圧力は木口へ向かって漏れて行くことが、高周波加熱下でも材内圧力が上がらない理由である。

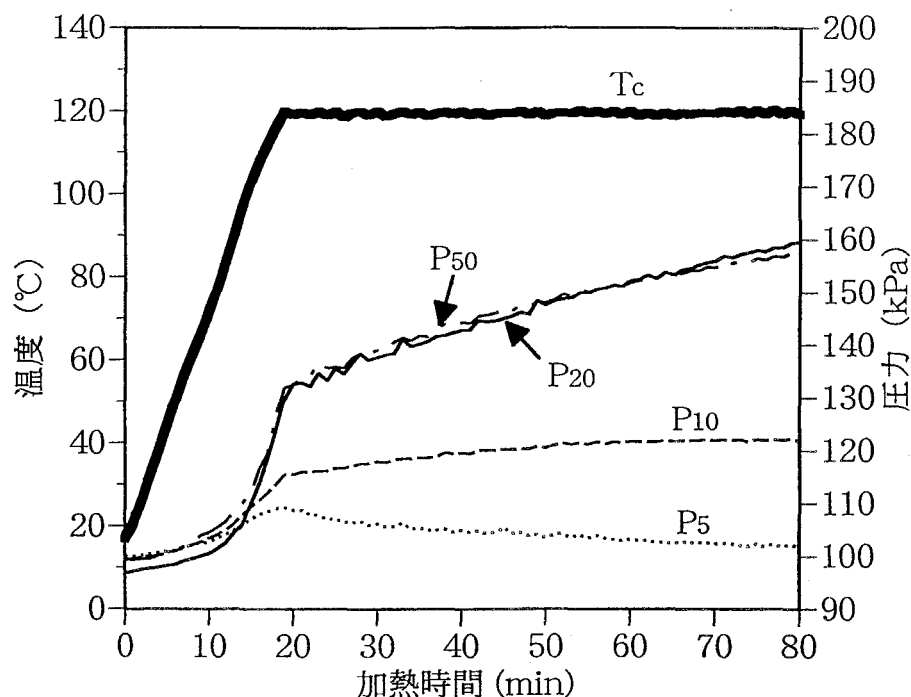


図3-9 高周波加熱過程における繊維方向の材内温度および材内圧力  
Tc: 中心温度; P50, P20, P10, P5: 木口から繊維方向に50, 20, 10および5cm離れた位置における材内圧力

上に示した例は、到達した材内圧力の最大値が比較的小さい場合であるが、300kPa 以上の比較的高い場合でも、木口に近い部分では圧力漏れが生じるが、木口から 20cm 離れた部分より中央側ではほぼ均一した材内圧力が得られた。本実験では、材内圧力は、繊維方向長さが 1m の試験材の中央付近で測定されているので、測定値への木口からの圧力漏れの影響はないと考えている。

### 3) 材内の温度および圧力の横断面内傾斜

スギ正角材を高周波加熱したときの、木口からの圧力漏れは、木口からの距離

が 20cm 以下の範囲にとどまっていることが、先の検討から明らかになった。したがって、実大材の長さ方向における材内圧力の分布は、木口から 20cm 付近までを除くと、ほぼ一定であると考えてよく、実大正角材内部の水分移動は、乾燥初期の高含水率域では、材中心の蒸気圧の上昇を駆動力として、木口方向への移動と内部から表層に向かう半径方向の移動との両者が存在すると考えてよい。

スギ 12cm 正角材を連続的に高周波加熱したときの、材内圧力の推移には 2 つのパターンがあった<sup>29)</sup>。いずれの場合にも、中心の最高温度は 120~140℃で、そのときの材内圧力の最大値は、約 360kPa であった。しかし、2 つのパターンの間では、高周波加熱終了時の含水率分布が異なる結果が得られており、160~200kPa の材内圧力を保持できる時間の長さが、両者の間で異なることがその理由であると考察している。この結果は、加熱過程における材内圧力の推移が、材内の水分移動に影響を与えることを示唆するものである<sup>29)</sup>。気体透過性が比較的良いとされるベイツガ材（含水率約 100%）を、缶体内圧力を 40mmHg、材温を 40℃で高周波真空乾燥した場合でも、減圧下にもかかわらず、材内圧力は 1300mmHg にまで達するとされている<sup>28)</sup>。この値は、本実験でいう材内圧力値に換算すると約 275kPa に相当し、高周波加熱を利用する乾燥法では、材内圧力の上昇が水分移動の重要な因子となっていることを示している。このようなことから、高周波・熱気複合乾燥では、材内の蒸気圧の上昇が、水分移動の主要な駆動力であると考えられるので、材内温度と材内圧力の挙動および分布など両者の相互関係を明らかにすることは、高周波・熱気複合乾燥の機構を解明するうえで重要な点である。

140℃まで加熱したときの、材内温度と材内圧力との推移を図 3-10a に示す。この例は本章で述べた 2 つの圧力推移パターンのうち、水分除去量が少なく中間部に水分残留が見られた場合と同様の例である。中心の温度上昇が先行し、中間部と表層のそれが追隨している。温度上昇に伴って、中心、中間部および表

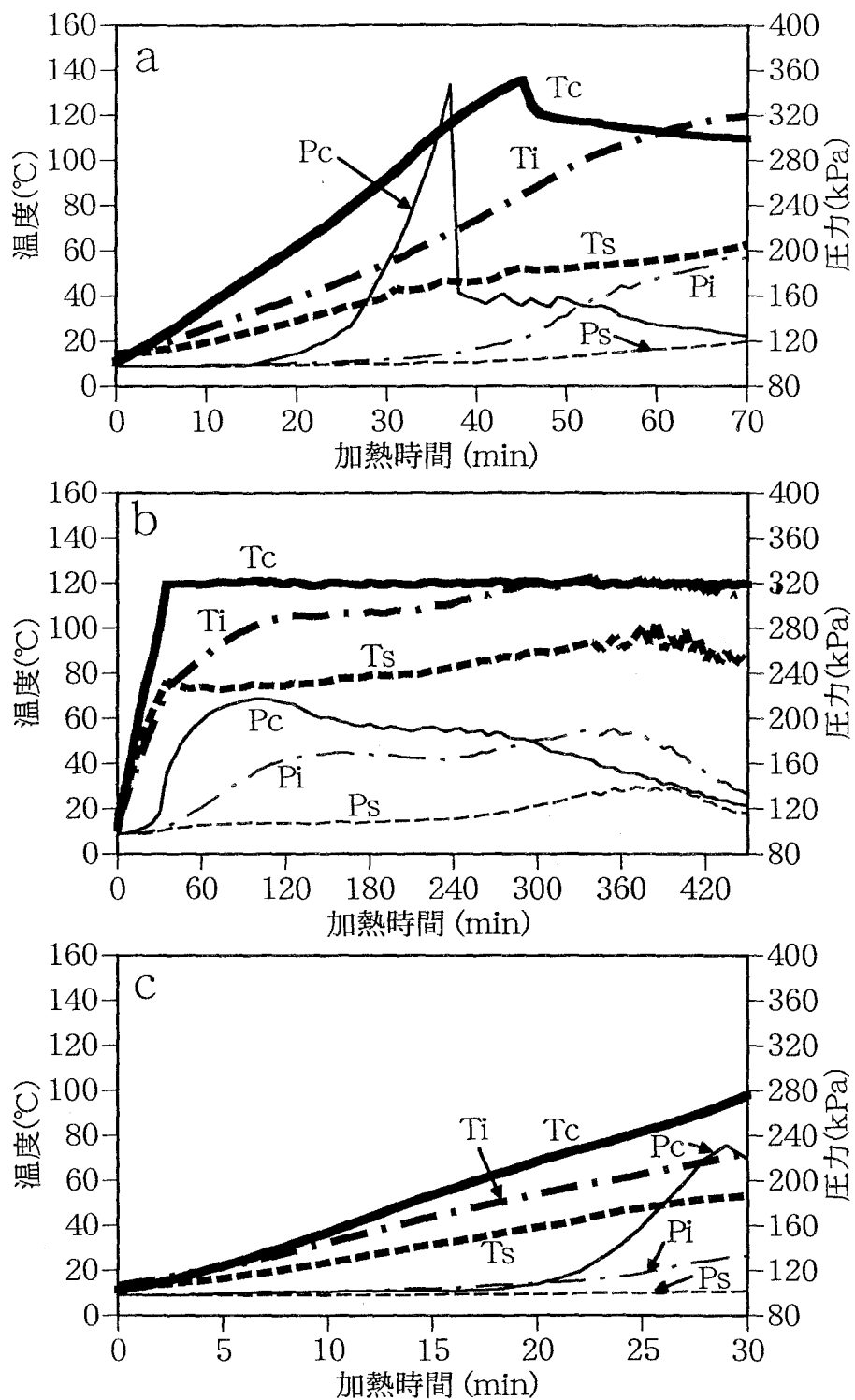


図3-10 高周波加熱過程における横断面内の材内温度および材内圧力  
Tc, Ti, Ts : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における温度  
Pc, Pi, Ps : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における圧力  
a : 140℃まで加熱 ; b : 120℃, 7時間の加熱 ; c : 101℃までの加熱

層とも材内圧力が上昇するが、中心および中間部では、80℃付近からの材内圧力の急速な上昇が測定された。中心温度がピークに達する直前に、中心の材内圧力は最大値を示した後、材内温度および材内圧力はともに低下した。とくに材内圧力の低下が急激で大きく、しかも約 160kPa 付近で数回の極大値を示しつつ低下する挙動が測定されて、前項の結果と同様な圧力推移を示した。この現象の原因は、材内圧力が木材組織内を通過して外側へと伝わっていること、あるいは、木材中の微細な間隙を通して、圧力が外部へ漏れていることにあると思われる。

その後、中心温度と材内圧力との低下が始まるころから、中間部の材内温度と材内圧力の上昇が始まり、やがて中心と中間部の間に材内温度と材内圧力の逆転が生じた。このような極大値を示すパターンでは、材内圧力が低下した直後の含水率分布は、中心で高い型を示し<sup>29)</sup>、水分移動の駆動力は材内圧力のみではないことを推測させる。しかし一方では、中心と中間部との間の材内温度と材内圧力が逆転する現象は、材内の水分状態と呼応するものと思われるので、材内圧力の推移と水分状態との関係については、今後さらに検討する必要がある。

中心温度 140℃で材内圧力が約 360kPa を示したことは、その温度における飽和水蒸気圧約 460kPa の約 80%まで到達したことであり、スギ正角材が非常に密閉度が高く、気体および液体の透過性が低い材であることを示すものである。そのために、100℃あるいは 120℃の比較的低温度の加熱でも、材内圧力の上昇が測定された。中心温度を 120℃で制御しながら、高周波加熱を 7 時間継続したときの、中心、中間部および表層における材内温度と材内圧力の推移を図 3-10-b に示す。中心温度は急速に上昇して 120℃に達したが、中心の材内圧力が最大値（約 230kPa）に達した時期は少し遅れた。中心温度は 120℃に維持されて、その部分の材内圧力は約 220kPa に上昇して最大値を示し、その値をしばらく維持した後徐々に低下した。その後もさらに加熱が継続されると、中間温度はさらに上昇を続けて、中心温度より高くなった。それと同時に、中間部の材内

圧力は中心のそれより高くなり、加熱の中心部分が中間部に移ったことを示唆している。しかし、中間部温度が 120℃を保持できる時間は短くて、やがて温度低下が始まると、それに追従するように中間部の材内圧力も低下した。次の段階に移ると、表層温度とその材内圧力は、中間部の温度と材内圧力と入れ替わるように上昇を始め、加熱が表層に移ったことを示唆する。しかし、材内圧力の最大値は常圧よりわずかに高い程度であった。最終的には、中心温度が 120℃に達したときから 7 時間後に、中心、中間部および表層の材内圧力はほぼ同じ値に収斂した。このように、120℃の加熱を継続すると、温度の推移に応じて材内圧力が推移する様子が観測され、材内における水分の存在状態との間に何らかの関係があることを示唆している。

中心温度が 101℃に達するまでの、材内温度と材内圧力との推移を図 3-10c に示す。140℃および 120℃の場合と同様に、中心温度が 80℃に達するころから材内圧力が急速に上昇し始め、100℃付近でこの場合の材内圧力の最大値約 240kPa に達した。この圧力値は、スギ正角材の内部水分の駆動力となりうる材内圧力である 160～200kPa<sup>29)</sup> より十分に大きな値であり、101℃加熱でも、内部水分を移動させるのに必要な駆動力を惹起できることを示している。このことは、高周波・熱気複合乾燥では、101℃の高周波加熱で実用的な効果が期待できることを示している。

#### 4) 材内圧力と水分状態

図 3-7 および図 3-8 で、高周波加熱を 1 時間連続して行くと、材内の圧力推移と含水率分布には、2 つのパターンが見られることを述べた。いずれのパターンの場合も、中心温度は約 140℃まで、材内圧力は 300kPa まで上昇したが、材内圧力の推移、および、高周波加熱後の含水率分布は異なっていた。すなわち、1 つのパターンは、160～200kPa の材内圧力を保持する時間が短く、この場合の高周波加熱後の含水率分布を見ると、表層では含水率が低い、中心から中間

部付近に高含水率部分が残っていた。他の1つのパターンは、160~200kPaの圧力を保持する時間が長く、中心付近の含水率が最も低くて表層のそれが最も高い状態を示していた。このことは、スギ正角材の中心付近の含水率を下げるには、160~200kPaの材内圧力と、その圧力の保持時間が関与することを示唆する。高周波・熱気複合乾燥法の実用化には、材内圧力の挙動と水分移動の関連を明らかにする必要がある。

中心温度が約140℃に達するまでの、中心、中間部および表層の材内圧力の推移を、加熱前後の含水率分布と関連させて図3-11の(a)と(b)に、それぞれ示す。中心温度の上昇および低下と、中心圧力のそれとはほぼ呼応して生じた。

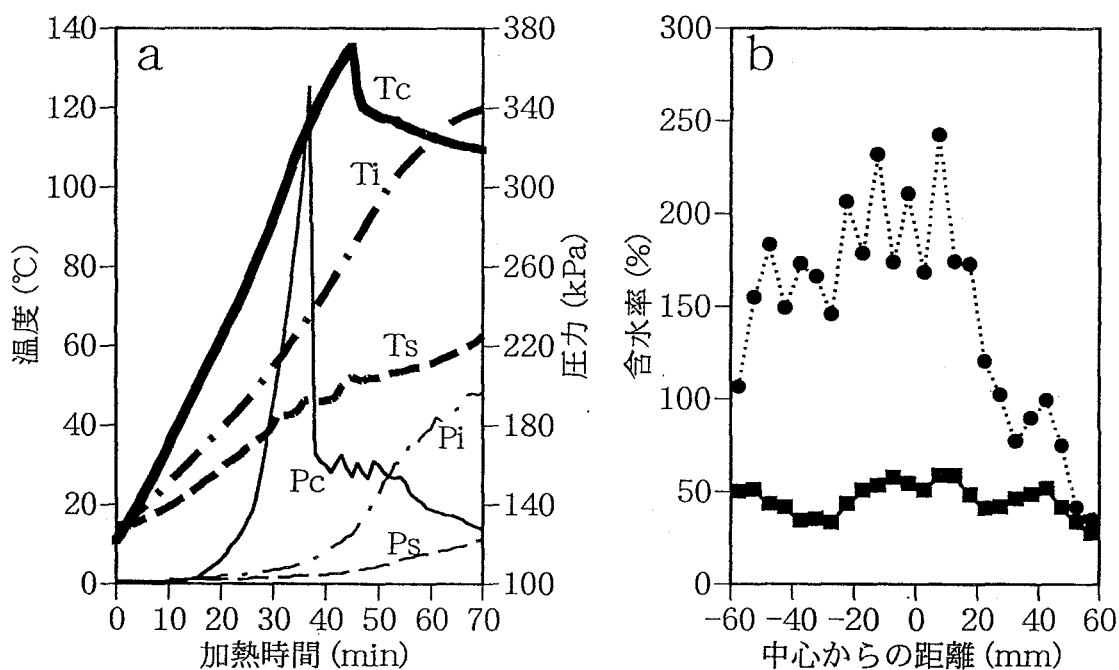


図3-11 140℃まで加熱したときの材内温度および材内圧力の推移(a)と含水率分布(b)  
Tc, Ti, Ts : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における温度  
Pc, Pi, Ps : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における圧力  
● : 乾燥前の含水率分布 ; ■ : 乾燥後の含水率分布



最高温度（138℃）で中心圧力は約 350kPa の最大値を示した後、温度の急激な低下に伴って約 160kPa まで急激に低下した。その後、中心圧力は数度の極大値を示しながら約 160kPa を保持した。中心温度が徐々に低下して 108℃に達したときには、表層圧力とほぼ同じ約 120kPa まで低下した。この圧力推移は、上述した 2 つのパターンの前者と同じで、スギ正角材の高周波加熱にあたって、しばしば観測される圧力推移である<sup>29)</sup>。スギ正角材では、中心温度は約 140℃、中心圧力は約 360kPa が到達する最大値で、この付近に達すると、中心圧力が低下する<sup>29,30)</sup>。中心温度の低下が約 120℃以降では緩やかであったことと、圧力は約 160kPa で増減を繰り返した後に低下した現象とから考えて、圧力低下の原因は、中心に生じた材内圧力の周辺への圧力漏れであろうと考えられるが、本実験では確認されていない。圧力測定ラインからの圧力漏れは観察されていないので、木材中に微細な損傷が生じ、その間隙を通して圧力が漏れたものとするのが妥当である。なお、図 3-11 では、温度と圧力の最大値が現れる時間にずれがあるが、この実験では、温度と圧力の測定位置が繊維方向に 5cm 離れていること、およびスギ正角材内の含水率のばらつきに関係があると考えている。

一方、中間部温度は、中心温度が低下するのとは逆に、さらに上昇を続け、加熱開始から約 60 分後には両者の間に逆転が生じた。しかも、逆転後も中間部温度はさらに上昇を続け、それに伴って、その部分の圧力も上昇を続けた。中間部では、加熱開始後 40 分を経過したころから、温度の上昇速度が大きくなり、この部分が盛んに加熱されていることを示唆している。中間部の温度上昇に追随して圧力も上昇し、やがて中心と中間部との間に圧力の逆転が生じた。このように、加熱される部分が中心から中間部へ移り、圧力が高い部分も中心から中間部へ移動する現象がしばしば見られた。

表層温度は中心および中間部より低く、60℃までの上昇にとどまった。その原因の 1 つとして、加熱過程で木材表層と雰囲気との間に蒸気圧差が生じ、表層

からの水分蒸散による気化熱を奪われることが挙げられる。

以上のような温度と圧力の挙動を図 3-11 に示し、70 分後に高周波加熱が停止されたときの材内の圧力の推移 (a) と含水率分布 (b) との関連を考察する。

この時点では、材内の各部分の含水率は 30% 以上で自由水が存在する。中心付近の含水率は、加熱前の約 200% から約 60% まで低下し、さらに、中心から約 3cm 離れている中間部の含水率が、隣接する中心および表層のそれよりも低い値を示している。一辺が 12cm のスギ正角材を高周波加熱すると、中心温度が 60℃ に達するころから、木口および材表面からの液相水分の流出が始まり、圧力上昇とともに徐々に増加する現象が観察されている<sup>29,31)</sup>。この現象から水分移動機構が想定できる。すなわち、まず、中心圧力の上昇によって、中心付近の水分が中間部へと流動する。中心の含水率が低下して、中間部の含水率が相対的に高くなると、その水分が加熱されて圧力上昇が生じ、その圧力によって、水分はさらに表層側へと流動するという水分移動の機構である。木口および表面から液相水分が流出すること、また、表層の含水率は繊維飽和点以上を示して、中間部の含水率とほぼ同程度であることは、表面からの水分蒸散量以上に、内部から表層へ水分が供給されていたことを示唆している。図 3-6 で、高周波・熱気複合乾燥過程では、まず中心付近の含水率が低下し、その後は含水率の高い部分から順次低下することによって、材内の含水率分布が平準化されながら乾燥が進行することを示した。この結果と、ここで想定した水分移動の機構とを併せて考えると、中心付近の含水率低下は、中心の材内圧力の上昇によって、中心付近の水分が外部へ向かって流動したためにもたらされた現象である、と考えることができる。このとき、流動の方向には繊維方向とそれに直角方向の 2 方向があり、水分透過性の難易から考えると、繊維方向への流動が支配的に生じると考えてよい。しかし、木口から 20cm 以上離れると、繊維方向の圧力分布は平準化していること、中心と中間部との温度と圧力が、加熱過程で逆転する現象から考えて、

木口から十分離れた部分では、繊維方向とそれに直角方向の 2 つの方向の水分流動が生じていると考えられる。

中心温度が  $120^{\circ}\text{C}$  に達した瞬間に加熱を停止した実験において、中心、中間部および表層の材内温度と材内圧力の推移 (a) と、加熱前と  $120^{\circ}\text{C}$  で加熱を停止した後の含水率分布 (b) とを図 3.12 に示す。中心温度が  $80^{\circ}\text{C}$  に達するころに圧力上昇が始まり、 $120^{\circ}\text{C}$  まで加熱される間に急速に増加して、中心の材内圧力が約  $280\text{kPa}$  に達した。このときの中間部温度は  $80^{\circ}\text{C}$  で、その部分の圧力は上昇し始めた状態である。表層温度は約  $60^{\circ}\text{C}$  で、圧力はまだ変化を示していない。この時点であっても、中心付近の含水率は、約  $220\%$  から約  $120\%$  まで低下した一方、中間部付近では加熱前の含水率とほとんど変わらないか、あるいは増加を示している部分も見られる。これらに対して、表層含水率の増減は見られ

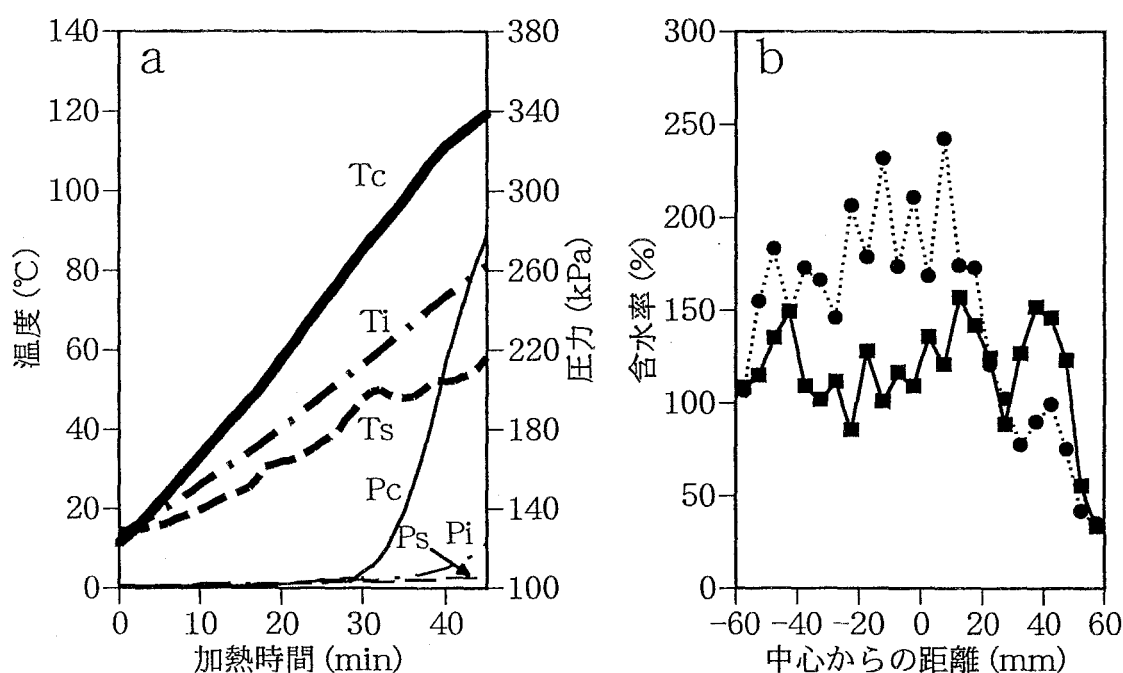


図3-12  $120^{\circ}\text{C}$  まで加熱したときの材内温度および材内圧力の推移(a)と含水率分布(b)  
 $T_c$ ,  $T_i$ ,  $T_s$  : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における温度  
 $P_c$ ,  $P_i$ ,  $P_s$  : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における圧力  
 $\bullet$  : 乾燥前の含水率分布 ;  $\blacksquare$  乾燥後の含水率分布

ない。材内に、中心で高く表層で低い温度傾斜が生じ、中心の圧力のみが顕著に上昇して、約 280kPa まで達した結果として、この含水率分布が得られたと考えられると、まず中心付近の含水率低下が生じることを示すものである。このとき、木口および表面から、液相水分の流出が観察されて、試験材は 1.48kg の重量減少を示したことから、中間部の含水率が増加を示したことは、中心の水分が中間部に移動し、中間部の水分は材内圧力で表層へ移動させられたと推測することもできる。材温と環境温度との間に約 60℃の温度差があるので、表面からの水分蒸散が起こっているが、表層含水率の変化が見られないことから考えて、内部から表層への水分供給があったことを示唆する。この例は、図 3-11a における 30～35 分までの各部分の温度と圧力の推移に類似している。図 3-12b では、加熱後には主として中心付近の含水率が低下しており、中間部の温度と圧力は低い状態である。このような状況から考えて、図 3-12b は図 3-11b に示した含水率分布に至る前の、スギ正角材内部の水分状態を示しているように考えられる。

高周波加熱下における水分移動の機構を考えるためには、ここで、図 3-12 に至る前の状態を観察する必要がある。そこで、中心温度が 101℃に達した瞬間に加熱を停止した時の、中心、中間部および表層の材内温度と材内圧力の推移 (a) と、加熱前と加熱終了後の含水率分布 (b) とを図 3-13 に示す。図 3-11 および図 3-12 と同様に、ここでも、中心温度が約 80℃に達するころから中心の圧力が急激に上昇し始めており、中心温度 80℃が高周波加熱の一つのポイントであることを示している。中心温度が約 95℃に達すると、圧力は最大値の約 235kPa に達した後、約 220kPa まで低下した。中心付近の含水率は、加熱前の約 125%から加熱後には約 80%まで低下した。中間部の圧力も徐々に上昇したが、到達圧力は約 135kPa にとどまった。表層温度は約 50℃までの上昇にとどまり、この部分の圧力上昇は見られなかった。この場合にも、加熱過程で、木口と材面の節部から液相水分の流出が観察され、試験材の重量減少は約 800 g で

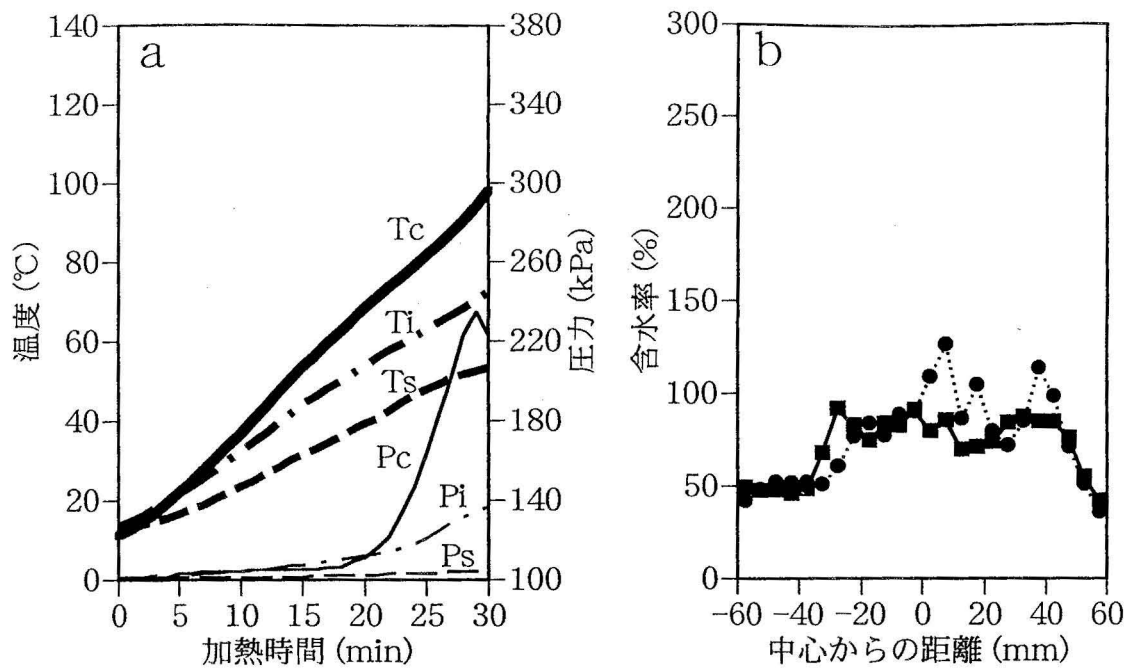


図3-13 101℃まで加熱したときの材内温度および材内圧力の推移(a)と含水率分布(b)  
Tc, Ti, Ts : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における温度  
Pc, Pi, Ps : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における圧力  
● : 乾燥前の含水率分布 ; ■ : 乾燥後の含水率分布

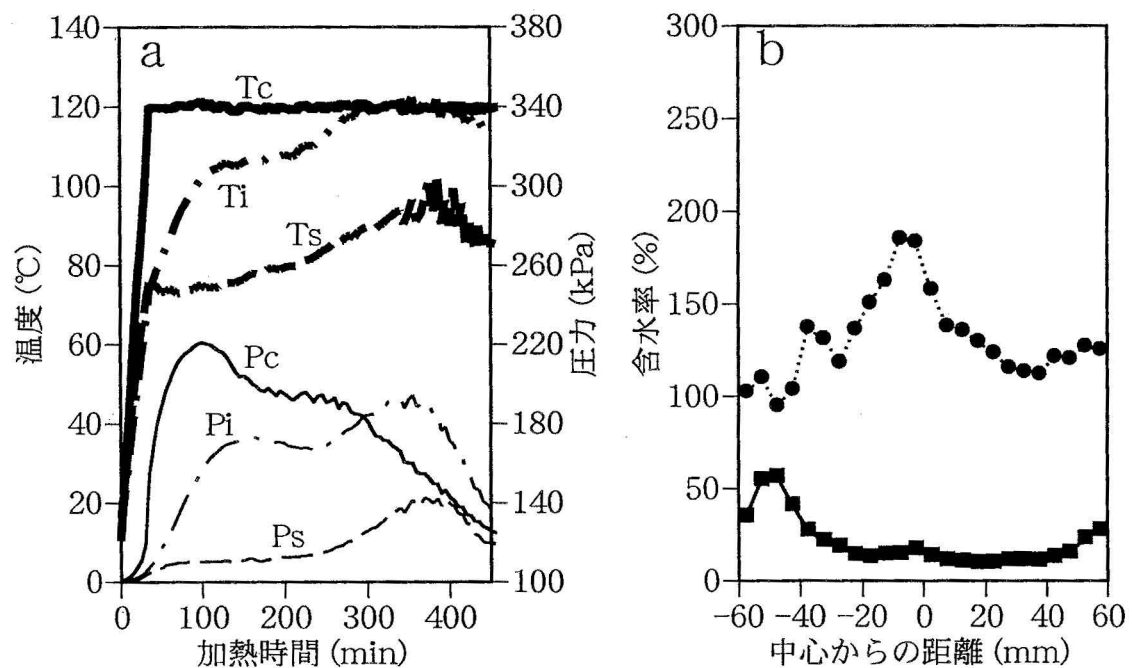


図3-14 120℃で7時間加熱したときの材内温度および材内圧力の推移(a)と含水率分布(b)  
Tc, Ti, Ts : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における温度  
Pc, Pi, Ps : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における圧力  
● : 乾燥前の含水率分布 ; ■ : 乾燥後の含水率分布

あった。

中心温度を 120℃に保持して 7 時間加熱したときの、中心、中間部および表層の材内温度と材内圧力の推移 (a) と、加熱前と加熱終了後の含水率分布 (b) とを図 3-14 に示す。中心温度が 120℃に 7 時間保持されている間に、まず中心の圧力上昇が生じた。それが約 220kPa の最大値に達した後、徐々に低下する過程で、中心に代わって中間部の圧力上昇が生じて、やがて両者は逆転した。中間部の圧力が最大値約 190kPa に達して低下が始まった後、表層の圧力が最大値の約 140kPa に達したのちに低下へと転じた。このように、各層が最大圧力に達する時点がずれて現れ、加熱時間の経過とともに、最大圧力が現れる部位が中心から中間部を経て表層へと移行した。中心および中間部ともに材内圧力の最大値は、120℃の飽和水蒸気圧と大気圧の和である約 299kPa に比べて低いが、160～200kPa 以上の圧力が保持された時間は長かった。このような温度と圧力の推移の結果として、図 3-14b に示されるように、中心から中間部分の含水率は 10～20%まで低下していた。しかし、表層の含水率は 30～50%を示し、いまだ自由水が存在する。高周波・熱気複合乾燥では、この部分の水分除去は熱気乾燥によって行われる。

加熱後の含水率分布から考えて、材内圧力が長時間にわたって保持された結果、内部水分が外へ向かって押し出されたと考えてよく、高周波加熱における水分移動の駆動力は材内圧力であることを示唆している。

中心温度を 101℃に保持しつつ 3 時間加熱したときの、中心、中間部および表層の材内温度と材内圧力の推移 (a) と、加熱前と加熱を停止したときの含水率分布 (b) とを図 3-15 に示す。中心のみならず中間部の温度も、加熱開始後約 30 分で 100℃に達した後に、その温度を保持しているが、図 3-11 の場合と比較して材内圧力の最大値は小さい。一方、表層温度は加熱後 90 分で 60℃に達し、その後ほぼ一定値を保持した。圧力もほぼ一定値を保持しているが、いず

れの部分でも、材内圧力の最大値は、140℃および 120℃の場合に比べて低く、中心であっても約 160kPa にとどまって、飽和蒸気圧に達していない。中間部および表層の圧力は、約 110kPa までの上昇にとどまった。材内圧力がこのような推移を示したときの、高周波加熱後の含水率分布を図 3-15b に示す。含水率が最も高かった部分は、材内圧力が最も高かった中心付近で、上昇が小さかった中間部では、それより小さい値にとどまった。図 3-13b の含水率低下に比べて、低下した値および低下した範囲ともに大きく、重量減少量は 1.43kg を示した。このことは、材内圧力が約 160kPa の低い値であっても、それが長時間にわたって保持されると、内部水分の除去効果が大きいことを示している。

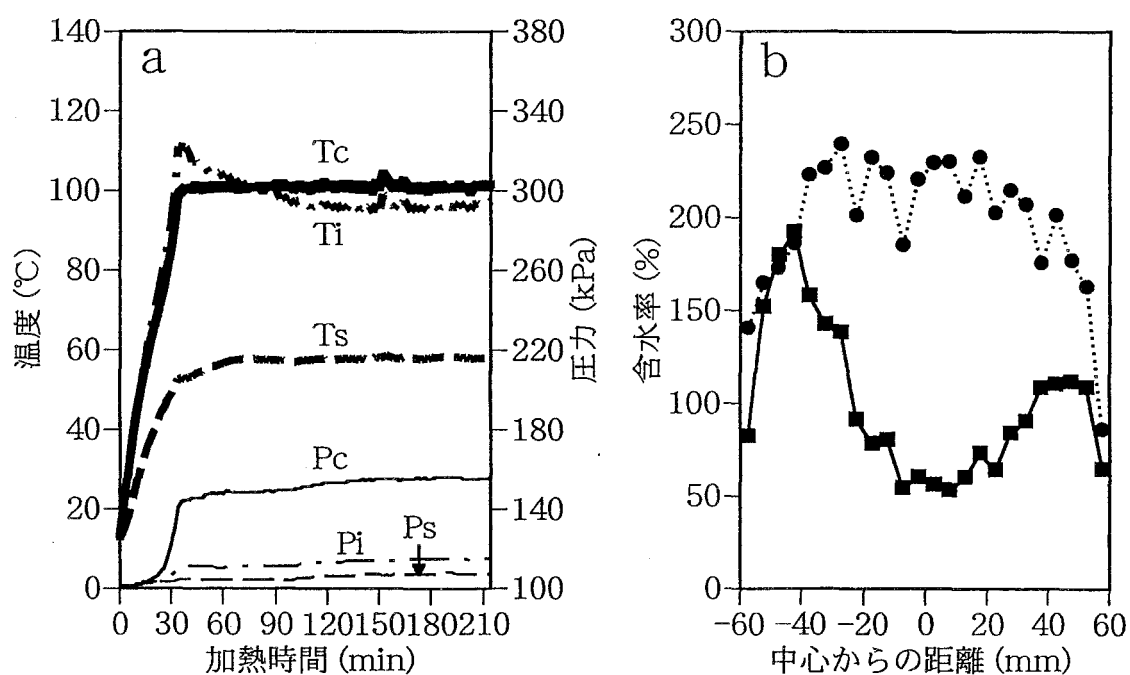


図3-15 101℃で3時間加熱したときの材内温度および材内圧力の推移(a)と含水率分布(b)

Tc, Ti, Ts : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における温度  
Pc, Pi, Ps : 材の中心, 中間および表層のそれぞれの部位における圧力  
● : 乾燥前の含水率分布 ; ■ : 乾燥後の含水率分布

中心から 4cm（表面から 2cm）離れた部分の含水率は高いが、この部分の乾燥は、通常の熱気乾燥でも比較的容易である<sup>32,33)</sup>。このことが、高周波加熱と熱気乾燥とを併用することによって、含水率分布を平準化できる理由である。高周波・熱気複合乾燥法では、中心温度を 101℃に設定して、乾燥時間を調節することにより、良好な乾燥仕上がり状態とコスト削減とが可能である<sup>16-18,34-36)</sup>。

### 3. 3 高周波加熱による水分流出

前節では、材内の温度、圧力および水分状態の関係について調べた。しかし、材内水分が、繊維方向および繊維と直角方向に、どの程度の割合で流出しているか明らかでない。

本節では、高周波加熱過程における木口と材面からの水分流出量を測定することで、材内水分の移動方向について検討する。

#### 3. 3. 1 実験方法

高周波加熱過程における木口からの水分流出量を、図 3-16 に示す方法で測定した。供試材を電極板で挟み、ロードセルを用いて重量を経時的に測定し、供試材全体の重量減少量 ( $A_1 + A_2$ ) を求めた。2つの木口面からの水分流出量 ( $B_1 + B_2$ ) は、木口に取り付けたプラスチック製の袋を介して回収し、その重量を測定した。4つの材面からの水分流出量 (C) は、全重量減少量から木口からの流出量を差し引いて求めた  $\{C = (A_1 + A_2) - (B_1 + B_2)\}$ 。これらの測定結果から、木口と材面とからそれぞれ流出する水分の割合を求めた。

#### 3. 3. 2 結果と考察

前節までの考察で、水分移動の駆動力は高周波加熱によって生じた材内圧力で



あり,それによって中心付近の水分が表層へと移動させられることが確認された。中心温度 101℃で 30 分間加熱したときの, 木口と材面からの水分流出量を図 3-17a に示す。水分流出量を重量減少量として測定した。木口からの水分の流出は, 材の中心温度が 60℃に達したときに最初に観察された。材内温度が 60℃から 101℃へと上昇する過程で, 試料の重量が減少した。材内温度が 101℃に達した後, 材内圧力は徐々に減少し, 重量の減少が停止した。木口と材面との水分流出量の比は, この時点で約 2:3 であった。

図 3-17b に示すように, 材内温度が 120℃まで加熱されたとき, 水分流出量と材内圧力は, 101℃までの場合と比較して大きく増加した。材内温度が 120℃に達して加熱を停止すると, 材内圧力は低下したが, 160kPa 以上の圧力は保持され, 重量の減少が続いた。材内圧力が 160kPa に低下したときの, 木口と材面との水分流出量の比は 1:3 であった。2 つの木口と 4 つの材面からの水分流出量から, 高周波加熱中においては, 材内で繊維方向と繊維に直角方向の 2 方向に水分移動が生じていることが確認された。

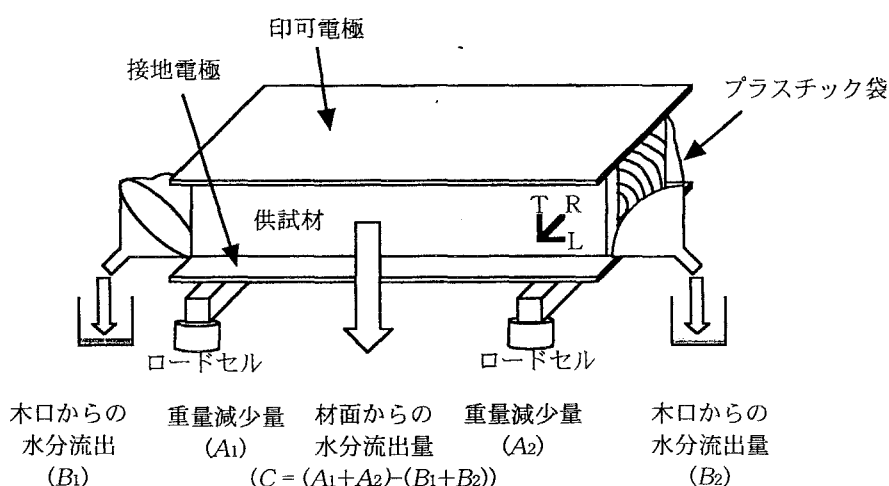


図3-16 水分流出の測定方法

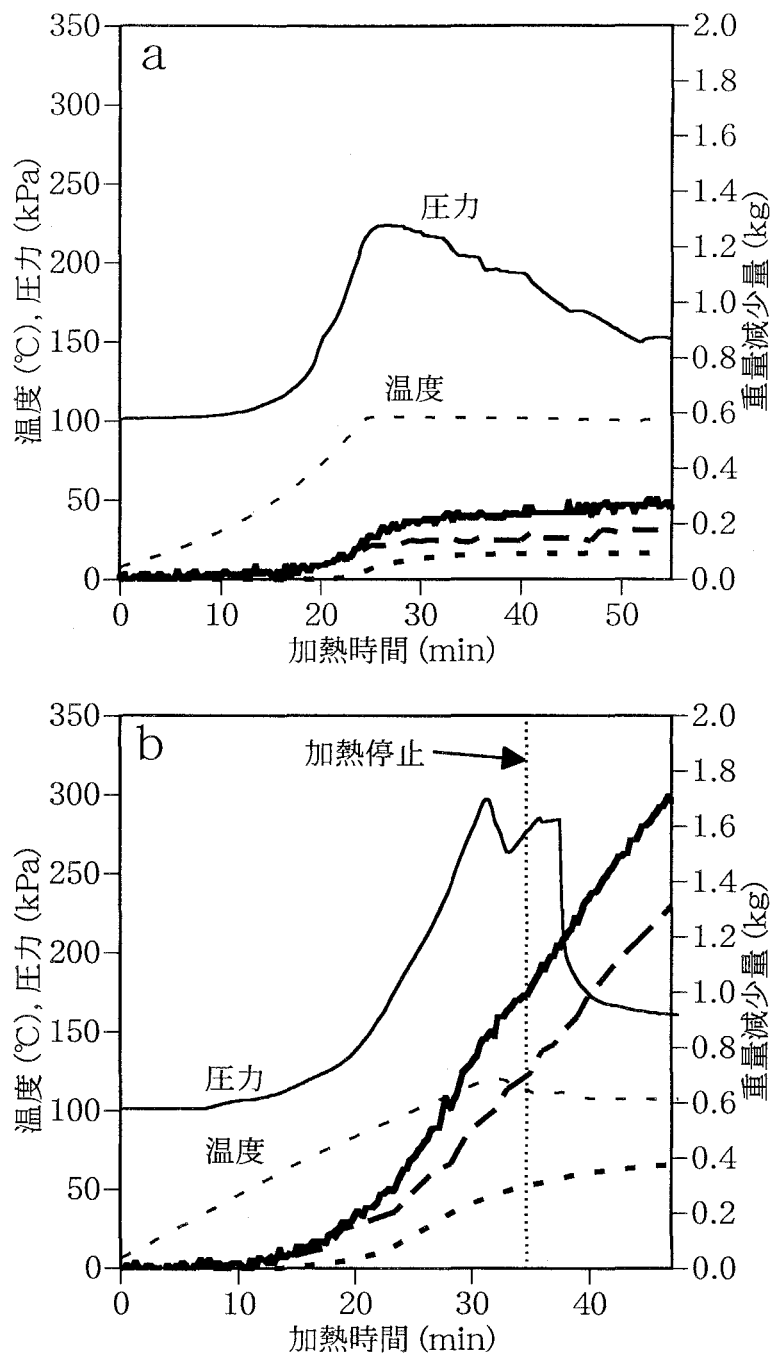


図3-17 材内温度および材内圧力と水分流出量との関係  
a: 101°C, 30分間加熱; b: 120°Cで加熱停止

— 全重量減少量  
- - - 木口からの流出量  
- · - 材面からの流出量

### 3. 4 材内圧力の関与

高周波・熱気複合乾燥における水分移動機構を調べるうえで、水分の移動経路を把握することは重要であるが、それを直接測定することは技術的に困難である。

本節では、ガス圧を用いて材内に染料を圧入することにより、高周波加熱によって生じる材内圧力を模擬し、横断面内の染色痕から、高周波加熱下における材内水分の移動経路の推定を試みた。

#### 3. 4. 1 実験方法

試料として、寸法が  $12 \times 12 \times 90\text{cm}$  のスギ心去り正角材を用いた。心去り材を用いた理由は、心持ち材にしばしば見られる髄割れが染料の移動経路となることを防ぎ、流動の異方性を正確に測定するためである。木材の浸透性には含水率が大きく影響する<sup>37)</sup>ので、繊維飽和点付近の低含水率材と約 100%の高含水率材について調べた。浸透の難しい高含水率材では、エンドマッチした材料を用いて、加圧時間の影響を調べた。

材内の水分移動経路の測定方法を図 3-18 に示す。長さ方向の中央に中心まで深さ 6cm の小孔（直径 2cm）を穿孔し、窒素ガスを用いて染料（0.5%酸性フクシン水溶液）を圧入した。窒素ガスの圧力値（200kPa および 360kPa）は、高周波加熱下における材内圧力の実験値に基づいて決定した。加圧時間は、低含水率材で 20 分、高含水率材で 60、120 および 180 分とした。圧入による染料の移動量を求めるために、加圧終了後の材を繊維方向に 5cm ごとに分割し、横断面内における染色痕の長さを接線方向および半径方向について測定した。

#### 3. 4. 2 結果と考察

材内における水分移動の距離および経路を求めるために、染料を圧入すると、

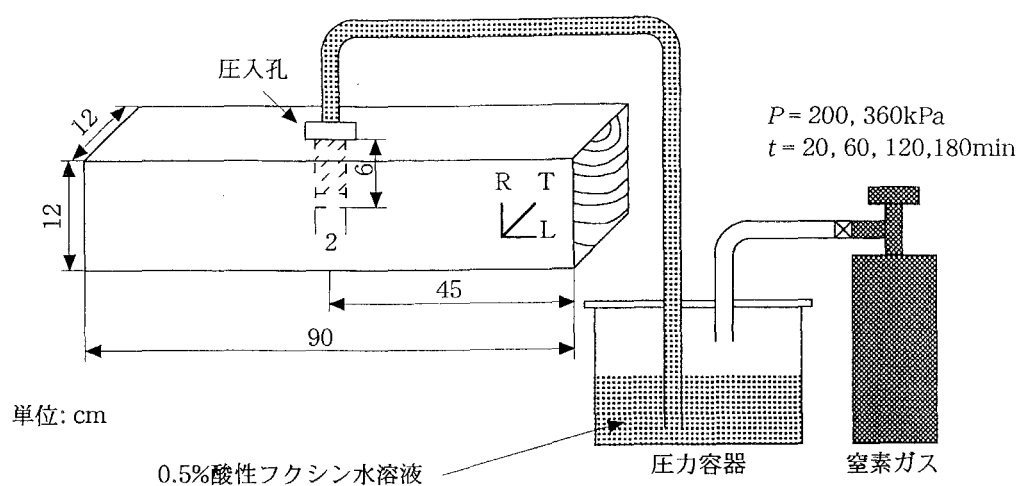


図3-18 染料の圧入方法

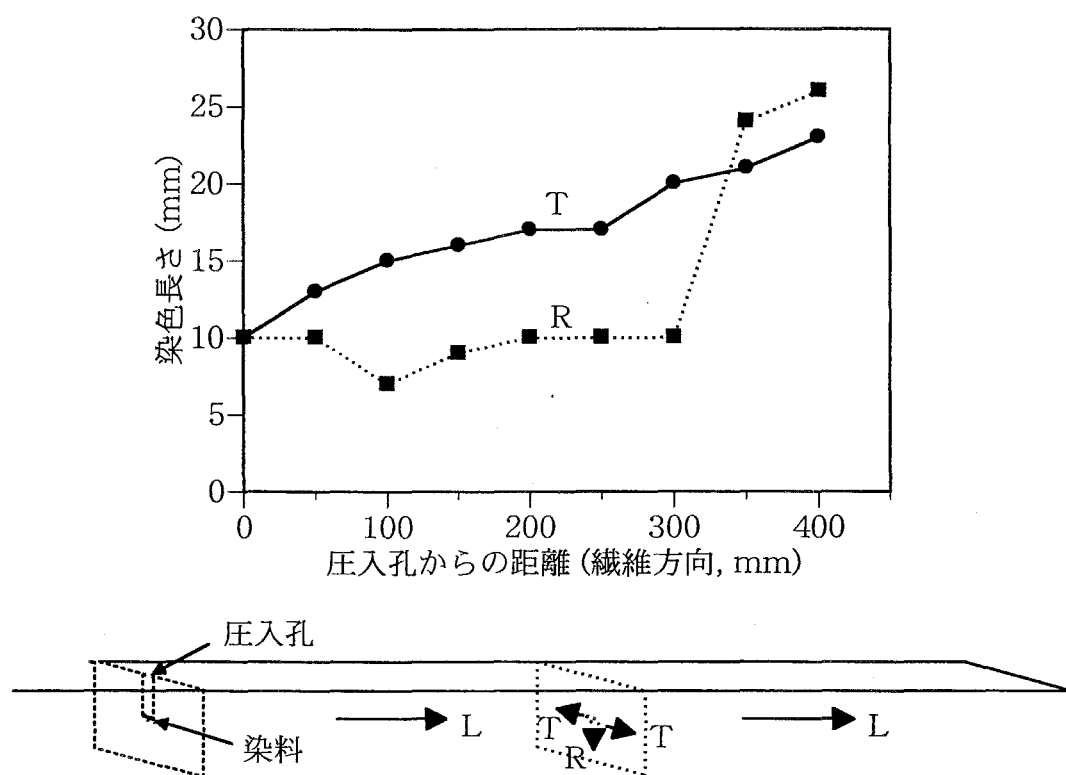


図3-19 染色長さと圧入孔からの距離との関係  
 (ガス圧力: 200kPa; 矢印は流動方向を示す)

染料は繊維方向に移動し、木口から流出した。また、繊維に直角方向へも浸透した様子が観察された。繊維に直角方向（半径方向と接線方向）への染色長さと圧入孔からの距離との関係を図 3-19 に示す。圧入孔からの距離が増すとともに、半径方向と接線方向への染色長さも増大した。この現象は以下のように説明できる。半径方向や接線方向に比べて繊維方向への流動は容易であるので、圧入孔から 25～30cm までの範囲では、繊維に直角方向への大きな染色は見られなかった。圧入孔から 30cm 以上離れると、とくに、半径方向への染色が観察された。圧入孔付近ではガス圧力が高く流動速度が大きいので、繊維方向への流動が率先し、繊維に直角方向への流動は小さい。しかし、圧入孔からの距離が長くなるとともに、ガス圧力は減少するので、染料が細胞内こうに溜まり、繊維に直角方向への浸透が可能になる機構がこの様子から推察できる。

上記の現象は、含水率が繊維飽和点付近の材においてしばしば観察された。染料の浸透には材の含水率が影響する<sup>37)</sup>。図 3-20 に、高含水率材に対して、圧力 360kPa で 60、120 および 180 分間の圧入を行ったときの染色長さを示す。接線方向における染色長さは、処理時間とともに増加し、圧入孔からの距離の増加とともにわずかに増加した。一方で、半径方向における染色長さは、圧入孔からの距離とともに減少した。しかし、処理時間が増加すると、半径方向の染色長さは増加した。この結果から、高含水率材においては、繊維に直角方向への流動、とくに半径方向への流動が起こりにくいことを示している。しかし、圧力が長時間作用し続けると、半径方向への流動も可能となるであろう。

これらの結果は、材内の液相水分が、材内圧力によって繊維方向だけでなく、それに直角方向へも移動可能であることを示唆している。

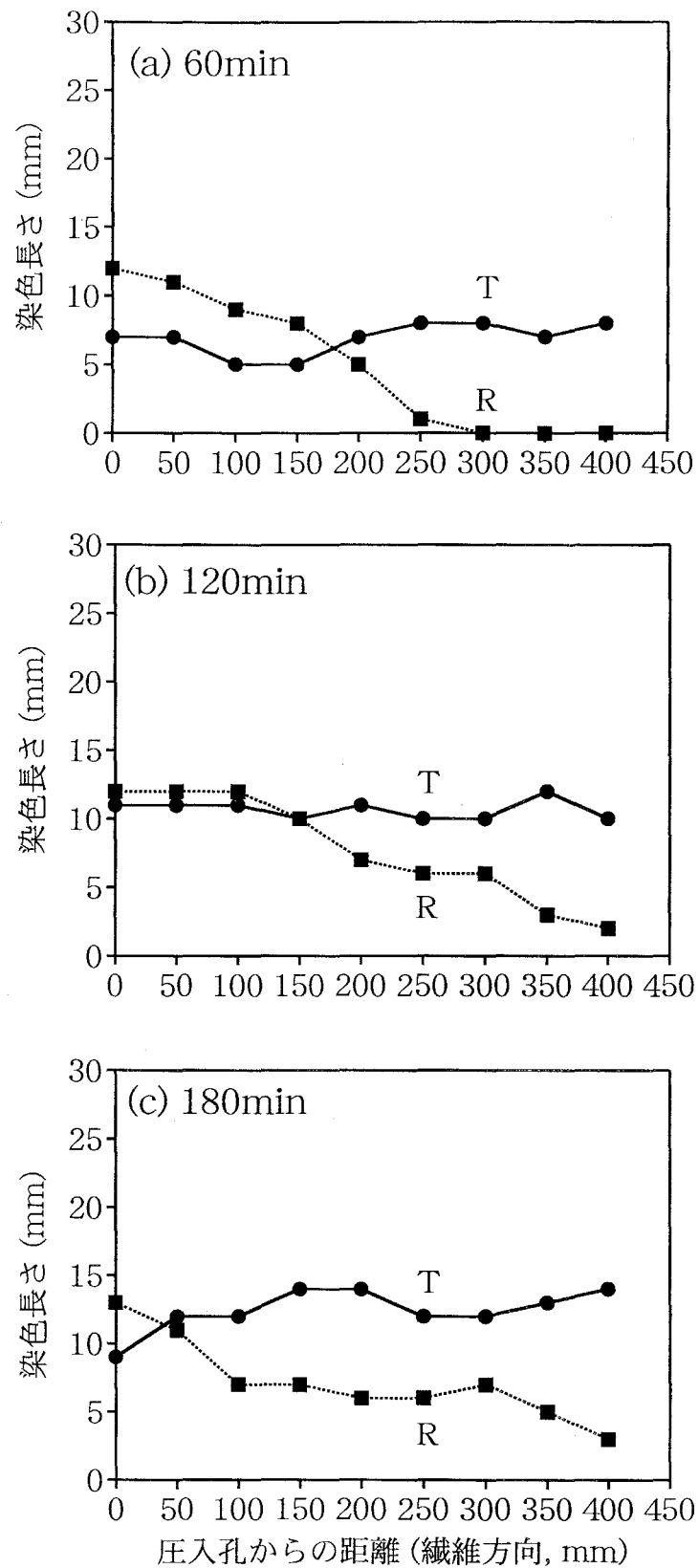


図3-20 染色長さと圧入孔からの距離との関係  
(ガス圧力：360kPa, 時間：60, 120, 180分)

### 3. 5 要 約

本章では、高周波・熱気複合乾燥における材内圧力の上昇に着目し、材内温度および材内圧力と、水分分布および水分移動との関係を、高周波加熱あるいは窒素ガス圧による染料の注入法を用いて調べた。結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) スギ正角材を高周波・熱気複合乾燥すると、中心温度の上昇による材内圧力の上昇が生じた。その結果、中心付近と表層の含水率の低下が先行し、次いで中間部のそれが追隨する推移を示した。乾燥の進行に伴って含水率分布は平準化された。
- 2) スギ正角材を高周波加熱すると、材内圧力の上昇と低下が観察され、材内圧力の大きさと低下のパターンによって、材内部の含水率低下の程度が異なった。
- 3) 材内圧力が最大値に達する部位が、乾燥の進行とともに中心から表層へと移り、それとともに横断面内の含水率分布の形態が変化した。
- 4) 材内圧力は、最終的には常圧近くまで低下して収斂した。このときの含水率分布は、中心から表層まで平準化されていた。
- 5) ガス圧を用いて材の中心に染料を圧入すると、染色部分が繊維に直角方向へも広がった。このことから、材の中心部に圧力が作用すると、中心付近の水分が表層へと移動可能なことが示唆された。

## 第 4 章 高周波加熱と熱気乾燥の複合効果

前章では、高周波・熱気複合乾燥において、高周波加熱が木材中の水分移動に及ぼす影響を調べ、高周波・熱気複合乾燥における高周波加熱の役割について明らかにした。本章では、熱気乾燥が果たす役割を論じる。そのために、4. 1 において、高周波加熱と熱気乾燥との複合効果を検討する。4. 2 において、高周波・熱気複合乾燥と高温乾燥との乾燥機構を比較する。

### 4. 1 熱気乾燥との比較

本節では、熱気乾燥、高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥における材内温度と材内圧力の推移、乾燥経過および含水率分布の推移を比較することによって、高周波加熱と熱気乾燥を複合したときのそれぞれの役割について検討する。

#### 4. 1. 1 実験方法

図 4-1 に示すように、長さが約 3.65m で、辺長が 12cm の、スギ生材の心去り正角材 9 体から、エンドマッチする長さが 1.5m の試験材を 2 本ずつ計 18 本を採取した。試験材の両端から繊維方向長さが 3cm の含水率測定用試験片を採取した。これら 18 本の試験材をエンドマッチするように組み合わせ、熱気乾燥と高周波加熱、高周波加熱と高周波・熱気複合乾燥、および高周波・熱気複合乾燥と熱気乾燥に供した。それぞれの試験材の 1 端木口から 27.6cm ごとに、繊維方向長さ 3cm の含水率測定用試験片の採取部位 ( $D_1 \sim D_4$ ) を設定し、乾燥開始から 1, 2, 3, 4 日後に順に切断採取した。参考資料を得るために、心持ち正角材を同様の方法で同時に供試した。

3 列 4 段にべた積みした試験材を 2 段ごとに電極板で挟んで、熱気乾燥、高



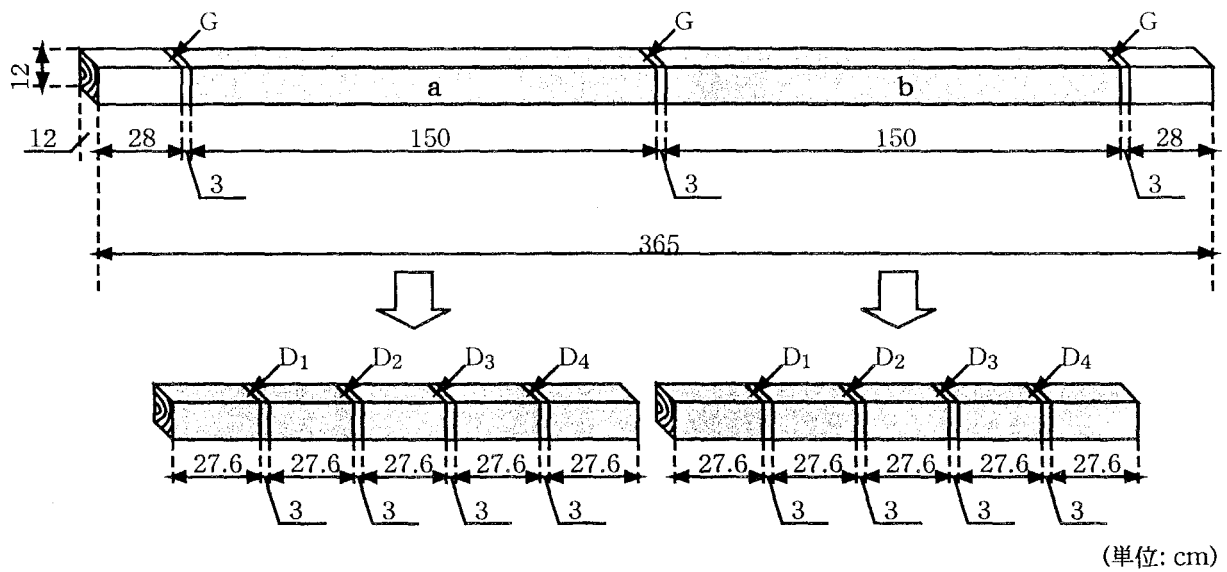


図4-1 試験材の採取方法

G : 生材含水率測定用試験片

D1~D4 : 乾燥開始から1~4日後の含水率測定用試験片

表4-1 乾燥条件

乾燥法	初期蒸煮			乾 燥				
	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)	乾燥時間 (時/日)×(日)	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)	乾燥時間 (時/日)×(日)	ファン	高周波加熱 (℃)
熱気乾燥	80	80	3×4	80	70	6×4	On	Off
高周波加熱	80	80	3×4	80	80	6×4	Off	101
高周波・熱気 複合乾燥	80	80	3×4	80	70	6×4	On	101

周波加熱あるいは高周波・熱気複合乾燥を行った。乾球温度 80℃、乾湿球温度差 0℃の条件で 3 時間の蒸煮を行った後に、表 4-1 に示す乾燥条件で 6 時間の乾燥を行った。その後、乾湿球温度差が 0℃になるまで蒸煮した後に、12 時間以上の自然冷却を行った。これを 4 回繰り返し、4 日間の間欠乾燥とした。供試した乾燥装置（ヤスジマ製 HTD-1 型）は、実用乾燥装置と同様に、試験材の長さ方向に熱風が循環する構造になっている。

高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥では、3 列 4 段にべた積みした試験材を電極板で挟み、中央の電極板を印加電極とした。印加電極の直上の試験材を材内温度制御用として、材の中心温度を 101℃で高周波の発振を ON-OFF した。発振周波数は 6.78MHz、定格出力は 6kW である。

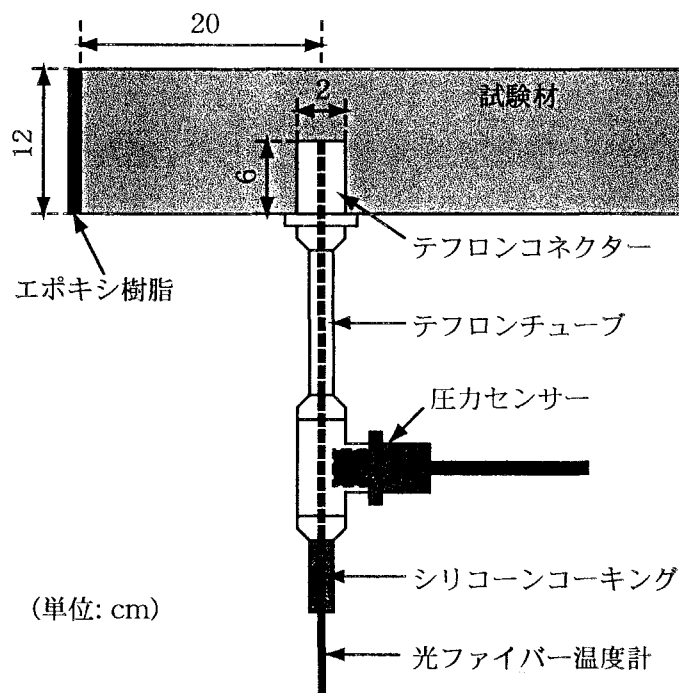


図4-2 材内温度および材内圧力の測定方法

図 4-2 に示すように、エポキシ樹脂でシールした木口から、繊維方向に 20cm 離れた位置に直径 2cm の小孔を、材中心（表面からの距離が 6cm）に達するように穿孔した。小孔にテフロンコネクターを挿入し、前章と同様の方法で試験材に密着させたうえで、圧力の漏れがないことを確認した。テフロンコネクターの中空に、光ファイバー温度計を挿入し、中空を通して温度と圧力とを同時に同位置で測定した。

乾燥過程における含水率および含水率分布の推移を測定した。1 日ごとの間欠乾燥を終了し、自然冷却して中心温度が約 30℃まで低下した材を、乾燥装置から取り出し、木口から繊維方向に 27.6cm 離れた位置から、繊維方向に 3cm の含水率試験片を採取し、含水率と水平方向の含水率分布を求めた。これを乾燥開始後 1, 2, 3, 4 日目に行った。

#### 4. 1. 2 結果と考察

材内の圧力挙動は、水分状態に大きな影響を及ぼし、材内の圧力挙動と乾燥経過との間には密接な関わりがある<sup>30,31,38</sup>ので、高周波・熱気複合乾燥過程の水分移動の機構を考察するためには、それぞれの乾燥法の材内圧力の挙動を詳細に検討する必要がある。熱気乾燥、高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥の材内温度と材内圧力の挙動を図 4-3 に示す。いずれの乾燥法でも、材の中心温度は、3 時間の蒸煮処理で約 75℃まで上昇した。熱気乾燥（図 4-3a）では、乾湿球温度差は 10℃に設定されているので、乾燥が始まると、材の表面温度は湿球温度付近まで下がり、中心温度もやや低下した。高周波加熱（図 4-3b）および高周波・熱気複合乾燥（図 4-3c）では、中心温度が急激に上昇し、目標温度である 101℃に達した後は一定に制御された。ここで、高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥では、中心温度は 101℃に達して、雰囲気温度よりも高いのに対して、熱気乾燥のそれは約 75℃である。熱気乾燥の乾球温度は 80℃であるので、中心温度

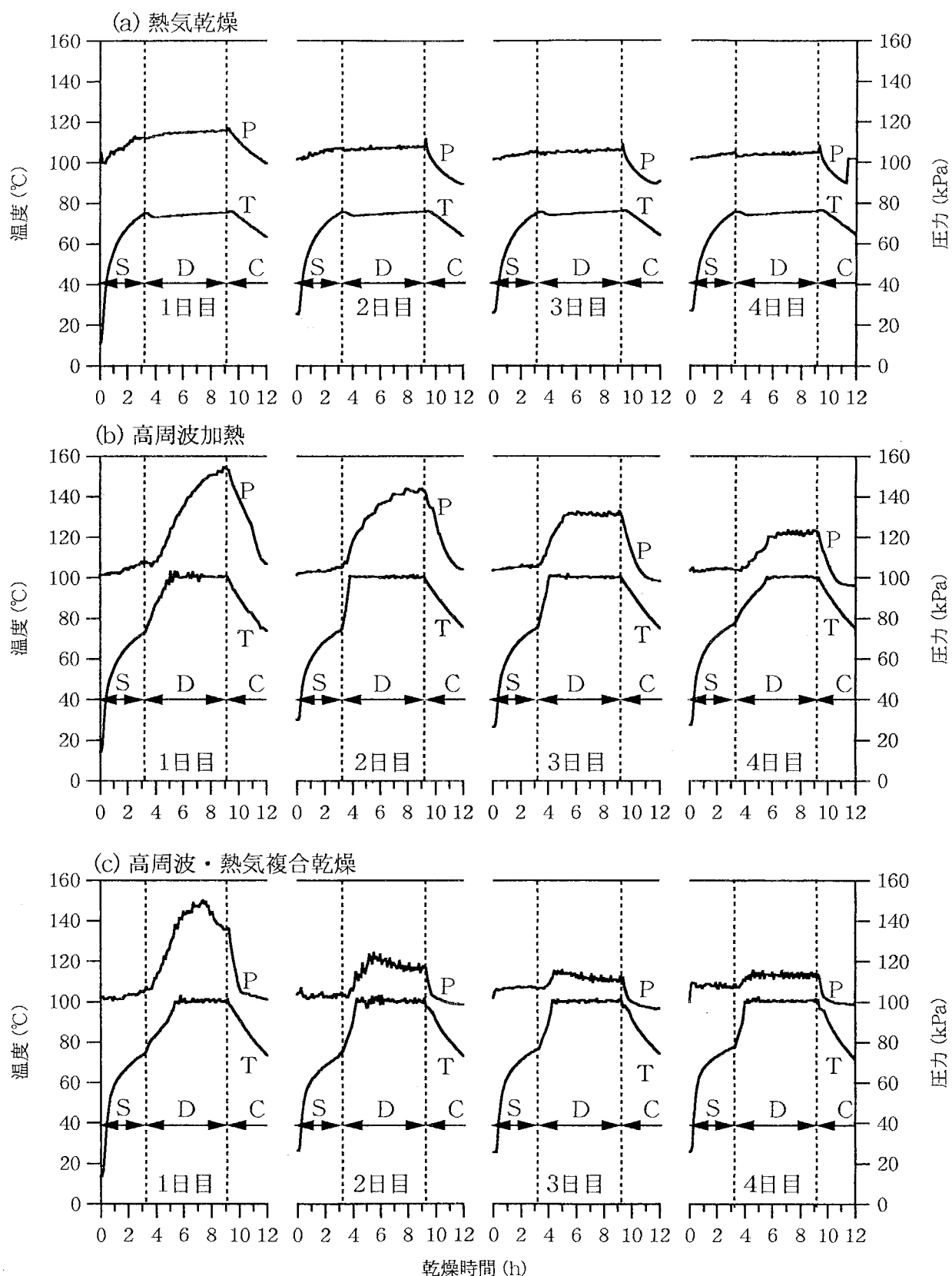


図4-3 材内温度および材内圧力の推移  
T: 材内温度 ; P: 材内圧力 ; S: 蒸煮期間 ; D: 乾燥期間 ; C: 冷却期間

と表層温度との差がほとんどない。このことは、中心と表層との間に生じる水分移動の駆動力は、熱気乾燥のそれよりも、高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥において大きいことを示している。

次に材内圧力の挙動に着目する。スギ正角材が高周波で 101℃に加熱されると、材内圧力は 160～200kPa まで上昇した<sup>31,38)</sup>。今回の実験に用いた試料でも、高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥では、中心圧力は 150～155kPa まで上昇した。中心圧力の上昇現象は外部加熱法である熱気乾燥でも観察されたが、図 4-3a に示されるように、熱気乾燥で得られた最大圧力は、115kPa で、高周波加熱のそれよりも低い値であった。熱気乾燥は、高周波加熱を応用する乾燥法とはこの点で異なる。熱気乾燥の材内圧力は、乾燥の経過とともに徐々に低下したが、小さい低下であった。

一方、高周波加熱と高周波・熱気複合乾燥における温度および圧力の挙動を図 4-3b および図 4-3c に示す。中心温度が熱気乾燥のそれより高いので、最大圧力値は高い値を示した。また、乾燥経過に伴う圧力低下が、熱気乾燥のそれより急激で、圧力挙動も複雑であることが波形から読み取れる。とくに、高周波・熱気複合乾燥における材内圧力の推移は特徴的で、第 1 日目から第 2 日目へ至る圧力低下が急激で大きく、第 3 日目から第 4 日目へは小さな変化で推移した。第 2 日目における材内圧力の波形を見ると、高周波加熱のそれと高周波・熱気複合乾燥のそれとの間に大きな違いが見られた。高周波加熱では徐々に上昇したが、高周波・熱気複合乾燥では急速に上昇した後、減少に転じた。後者では、材内温度は 101℃で一定であることを考えると、第 3 日以降の材内圧力が 110～115kPa で推移していて、常圧からの上昇はほとんど見られなかったことは、材内水分の減少を示唆している<sup>38)</sup>。これに対して、高周波加熱において、乾燥経過に伴う圧力低下は、熱気乾燥のそれに比べて変化は大きいですが、高周波・熱気複合乾燥のそれほど急激ではなかった。このことは、内部水分の減少が、緩やかではあるが

着実に進行していることを示唆している。高周波・熱気複合乾燥においては、第 1 日目と第 2 日目の圧力低下が大きく、第 3 日目と第 4 日目では常圧に近い一定値で推移する傾向を示し、材内圧力の挙動は、熱気乾燥のそれと高周波加熱のそれとが複合されたような傾向を示した。高周波加熱法と高周波・熱気複合乾燥法との違いは熱気乾燥の関与の有無にあり、これが両乾燥法の圧力推移、乾燥経過あるいは含水率分布の推移の差異に関与していることをうかがわせる。

熱気乾燥、高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥の乾燥経過の一例を図 4-4 に示す。熱気乾燥の乾燥速度は、高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥の乾燥速度に比べて著しく小さかった。また、熱気乾燥における第 1 日目には、表層水分は効率的に除去された。第 2 日目以降になると、乾燥速度が急激に低下した。そのため、乾燥終了後の含水率は 77%にとどまった。これに対して、高周波加熱と高周波・熱気複合乾燥では、第 1 日目の含水率低下が著しく大きいうえに、第 2 日目以降にもある程度の乾燥速度を維持した。4 日間の乾燥終了後の含水率は、それぞれ 16%、13%であった。高周波加熱で乾燥初期の含水率低下が大きいことは、液相水分の除去が効果的に行われたことを示すものである。さらに、高周波加熱と高周波・熱気複合乾燥とを比較すると、両者の間には第 2 日目の乾燥経過に差異が見られた。高周波加熱では含水率低下は 11%であるのに対して、高周波・熱気複合乾燥では 20%の低下が得られた。乾燥中期の含水率低下に、両者の差異が顕著に表れていることから、高周波・熱気複合乾燥において、気相水分の除去に熱気乾燥の寄与があることが示唆された。

以上の結果から、熱気乾燥、高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥のそれぞれの特徴は、以下のようにまとめられる。すなわち、熱気乾燥では、表層に十分な水分が存在する乾燥初期において高い乾燥速度を示した。高周波加熱では、効率的な含水率低下が、乾燥末期に至っても持続された。高周波・熱気複合乾燥では、乾燥中期から末期に至っても、乾燥速度は高周波加熱のそれよりも大きかつ

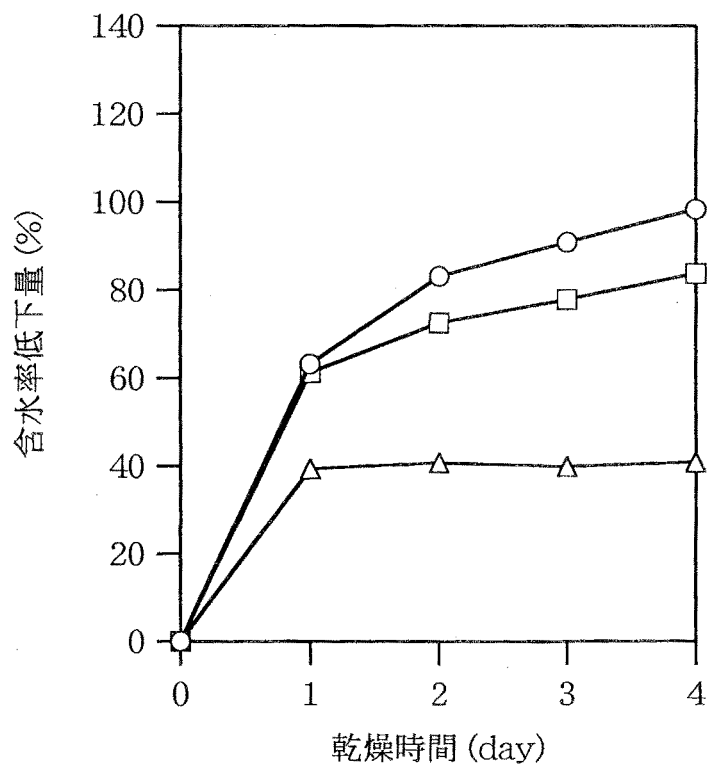
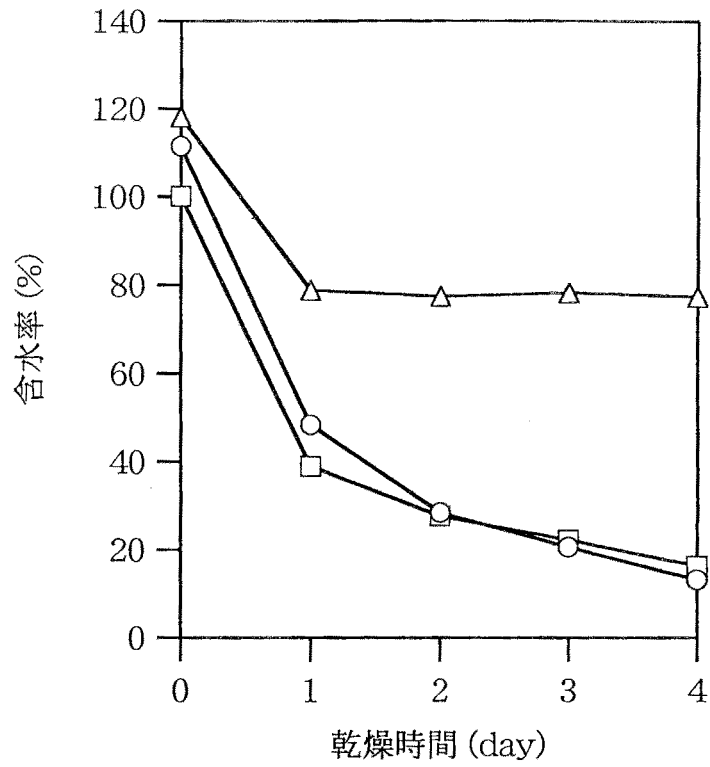


図4-4 3つの乾燥法の乾燥経過  
 ○：高周波・熱気複合乾燥；□：高周波加熱；△：熱気乾燥

た。ここに高周波加熱に熱気乾燥を導入した効果が見い出される。

スギ正角材を熱気乾燥すると、含水率分布は表層で低く中心で高い山型を呈し<sup>39)</sup>、高周波真空乾燥では、含水率低下は材の内部から進行する<sup>19)</sup>。これらに対して、高周波・熱気複合乾燥では、乾燥初期には材の内部と表層との含水率低下が同時に進行し、含水率分布が平準化されつつ乾燥した(3. 1 節)。図 4-5 に熱気乾燥、高周波加熱、高周波・熱気複合乾燥における乾燥過程の含水率分布を示す。試験材には心去り材を用いているので、図に示される含水率分布は、左から右方向へ髄側から樹皮側への分布を示している。図 4-5a に示す熱気乾燥の場合には、第 1 日目の乾燥で表層の含水率が低下しているが、第 2 日目以降から第 4 日目までは、含水率分布に顕著な変化は見られなかった。材の内部は、生材時の含水率分布の形態を残し、4 日間の乾燥期間では内部の乾燥が進行しないことを示している。このことは、図 4-4 の乾燥経過において、第 1 日目には 118% から 79% までの大きな含水率低下が見られたが、第 2 日目以降では乾燥が停滞していたことと対応している。

図 4-5b に示す高周波加熱の場合には、第 1 日目の乾燥では、生材時の含水率分布の形態を残しつつ、表層から中心までの範囲で大きな含水率低下が見られた。第 2 日目には、樹皮側の部分の含水率低下が見られ、含水率分布は平準化されつつあることがわかる。第 3 日目以降には、含水率分布の平準化が着実に進行している様子が見られた。このことは、図 4-4 の乾燥経過において、第 1 日目に 100% から 39% までの低下を、第 2 日目には 39% から 28% までの低下を、さらにその後も着実な含水率低下を示したことと対応している。また、材内圧力が徐々にではあるが着実に低下した(図 4-3b) こととも対応している。乾湿球温度差が 0℃であるにもかかわらず、表層含水率の低下が測定された。理由は、試験材の表面温度は乾球温度(80℃)より高い温度を示すためである。

図 4-5c に示す高周波・熱気複合乾燥の場合には、第 1 日目と第 2 日目には高



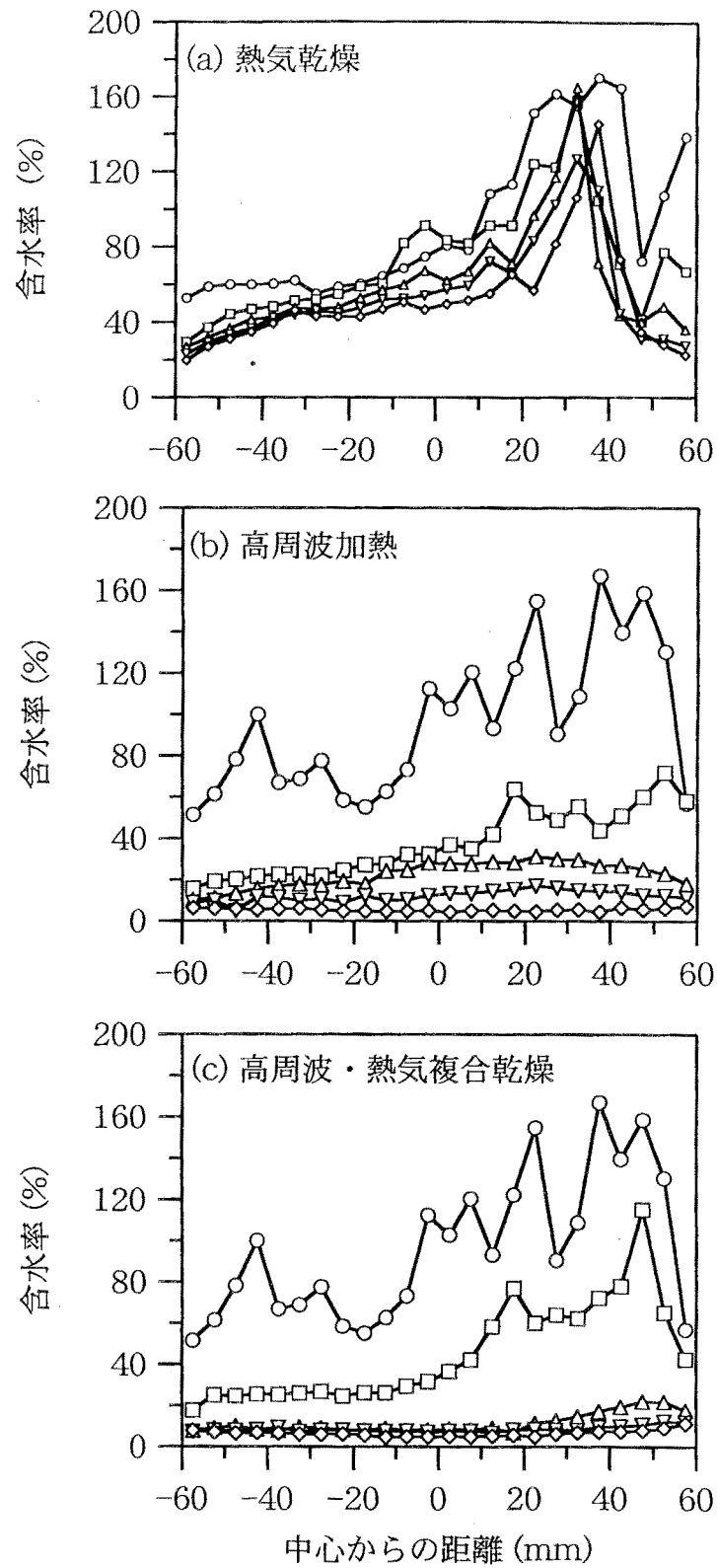


図4-5 3つの乾燥法の含水率分布の推移

○: 乾燥前 ; □: 1日後 ; △: 2日後 ; ▽: 3日後 ; ◇: 4日後

周波加熱の場合と同様の含水率分布傾向を示したが、第3日目以降では異なり、平準化が急速、均一であった。このような含水率分布の推移は、図 4-3c と図 4-4 に示される材内圧力と乾燥経過の裏付けとなる。

以上の結果から、高周波加熱を用いると、材内圧力を駆動力として、乾燥初期に液相水分を除去できる<sup>38)</sup>ことが示唆された。熱気乾燥に高周波加熱を導入すると、内部水分を除去しながら同時に表層の水分も除去でき、単一乾燥では得られない複合効果が得られた。

## 4. 2 高周波・熱気複合乾燥と高温乾燥との差異

近年、乾球温度を 100℃以上に設定し、低湿で乾燥する高温乾燥法が提案されている<sup>40)</sup>。高温乾燥法の特徴として、短時間乾燥が可能で、表面割れが少ない点などが挙げられている<sup>40)</sup>が、一方で、内部割れの発生が指摘されている<sup>2)</sup>。

本節では、高周波・熱気複合乾燥および高温乾燥における材内の温度と圧力の推移、あるいは乾燥経過および含水率分布の推移と内部割れの発生とを比較することにより、高周波・熱気複合乾燥法と高温乾燥法の水分移動機構の違いを検討した。

### 4. 2. 1 実験方法

長さが約 3.65m で、辺長が 12cm の、生材のスギ心去り正角材 6 体（含水率 103～144%）を用いた。図 4-6 に示すように、1 体の供試材から、繊維方向の長さが 60cm の連続した試験材を 5 本切り出し、高周波・熱気複合乾燥あるいは高温乾燥に供した。供試材から試験材を採取するのと同時に、各試験材の両端に位置する部分から、厚さ 3cm の含水率測定用試験片を 1 枚ずつ、合計 6 枚を採取し、生材時の含水率および含水率分布を測定した。なお、内部割れによる

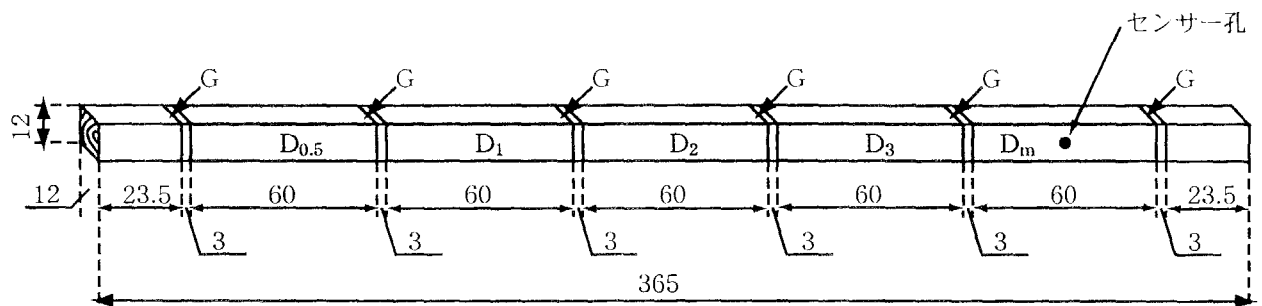


図4-6 試験材の採取方法

G：生材含水率測定用試験片

D<sub>0.5</sub>～D<sub>3</sub>：0.5～3日間の乾燥に供する試験材

D<sub>m</sub>：材内温度および材内圧力測定用試験材

表4-2 乾燥条件

乾燥法	初期蒸煮			乾 燥			
	乾球温度	湿球温度	時 間	乾球温度	湿球温度	材内温度	時 間
	(℃)	(℃)	(h)	(℃)	(℃)	(℃)	(h)
高周波・熱気 複合乾燥	80	80	3	80	70	101	72
高温乾燥	95	95	3	120	90	-	72

繊維方向への水分移動の影響を考察するために、試験材には木口シールを施さなかった。

1本の供試材から連続して採取した5本の試験材を、表4-2に示す乾燥条件で高周波・熱気複合乾燥あるいは高温乾燥した。5本のうち1本の試験材を、材内の温度および圧力の測定に用い、残る4本の試験材を乾燥過程における重量、含水率および含水率分布の測定に用いた。乾燥開始から0.5, 1, 2, 3日後に、1本ずつ取り出してすばやくビニル袋に密封し、重量を測定した。それを別の恒温恒湿器に移して、以下の条件で冷却養生した。冷却養生は、高周波・熱気複合乾燥では乾球温度60℃、相対湿度57%の条件で12時間、その後、40℃、49%の条件で6時間とした。高温乾燥では、乾球温度80℃、相対湿度22%の条件で12時間、その後、40℃、相対湿度13%の条件で6時間養生して、含水率および含水率分布を測定した。乾燥過程の含水率および含水率分布を、試験材の長さ方向の中央付近から採取した試験片より求めた。その隣接部から、断面観察用の試験片を採取し、乾燥過程における内部割れを観察した。

高周波・熱気複合乾燥と高温乾燥について、1回に5本ずつを用いてそれぞれ3回の乾燥試験を行った。実験には、前節と同じヤスジマ製を用いた。前節と同様の方法で、試験材の材内温度および材内圧力を、同位置で同時に測定した。

#### 4. 2. 2 結果と考察

高周波・熱気複合乾燥と高温乾燥との水分移動の機構の違いを明らかにするために、材内の温度と圧力の挙動、乾燥経過、含水率分布および内部割れの状況について考察した。

高周波・熱気複合乾燥法と高温乾燥との材内温度および材内圧力の推移を図4-7に、乾燥経過を図4-8に、含水率分布の推移を図4-9に、さらに横断面写真を図4-10にそれぞれ示し、これらを総合的に考察して高周波・熱気複合乾燥法

と高温乾燥法との差異を検討する。

高周波・熱気複合乾燥では、乾燥開始と同時に、材内温度が上昇し、それに伴って材内圧力が上昇した。材内圧力の上昇は急激で 140kPa まで到達したが、その後急速に低下した（図 4-7）。その結果、乾燥は急速かつ着実に進行し、含水率は 3 日間で約 10%まで低下した（図 4-8）。乾燥過程で、中心付近と表層の含水率低下が先行し、含水率分布は一時的に M 字型を呈したが、2 日目以降にいたると平準化された（図 4-9）。2 日目以降には、中心付近の含水率は約 5%まで低下していたが（図 4-9）、横断面に内部割れは発生しなかった（図 4-10）。この間に内部含水率の急速な低下が見られた（図 4-9）。

一方、高温乾燥でも乾燥は急速かつ着実に進行した（図 4-8）が、材内圧力と含水率分布の推移とは、高周波・熱気複合乾燥のそれとは異なっていた。材内圧力は、乾燥開始直後には約 107kPa を保持したが、高周波・熱気複合乾燥のそれよりも低い値であった（図 4-7）。この間の含水率分布は、中心付近で高く表層で低い山型を呈していた（図 4-9）。乾燥開始から 1 日目以降に、材内圧力の緩やかな低下が始まり（図 4-7）、それに伴って、それまで繊維飽和点以上を保持していた中心付近の含水率が、低下を開始した（図 4-9）。圧力低下と中心付近の含水率低下が進んだときは、内部割れが生じたとき（図 4-10）と一致しており、内部割れが内部水蒸気の外部への通路の作用をしたことをうかがわせた。内部割れの発生の有無が、高周波・熱気複合乾燥法と高温乾燥法との大きな相違点であった。

高周波・熱気複合乾燥法は、材内圧力の上昇によって生じる材内と外部との蒸気圧差が、水分移動の駆動力となる乾燥法である。それに対して、高温乾燥法は、外部から与えられた熱によって材表面の蒸散が促進され、水分の濃度勾配による拡散が水分移動の駆動力となる乾燥法で、このとき、内部割れが含水率分布の平準化に関与する。

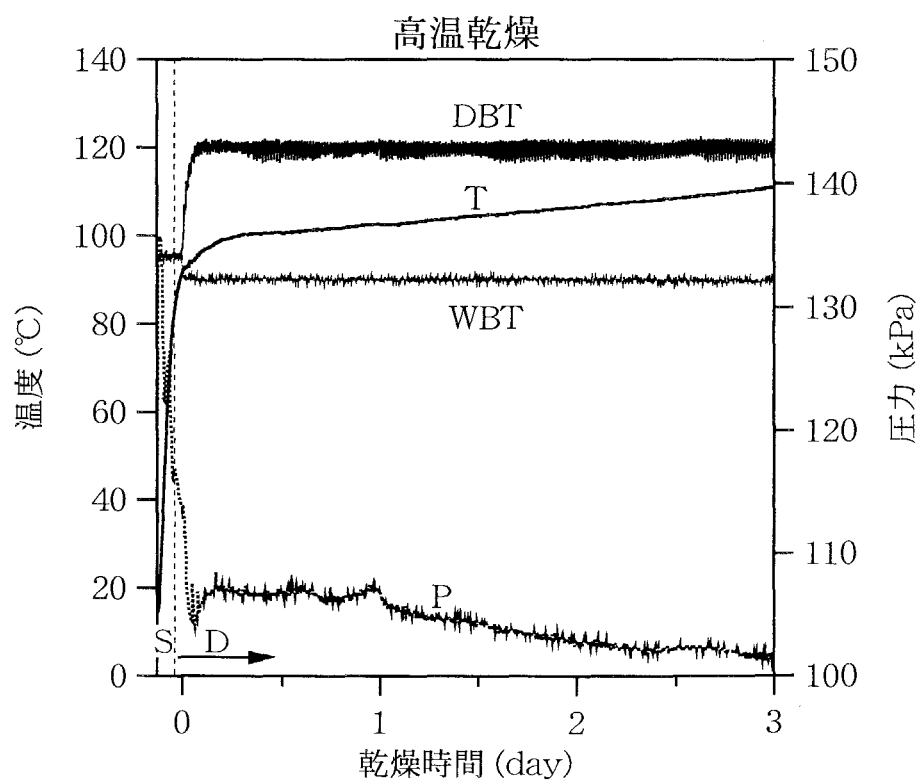
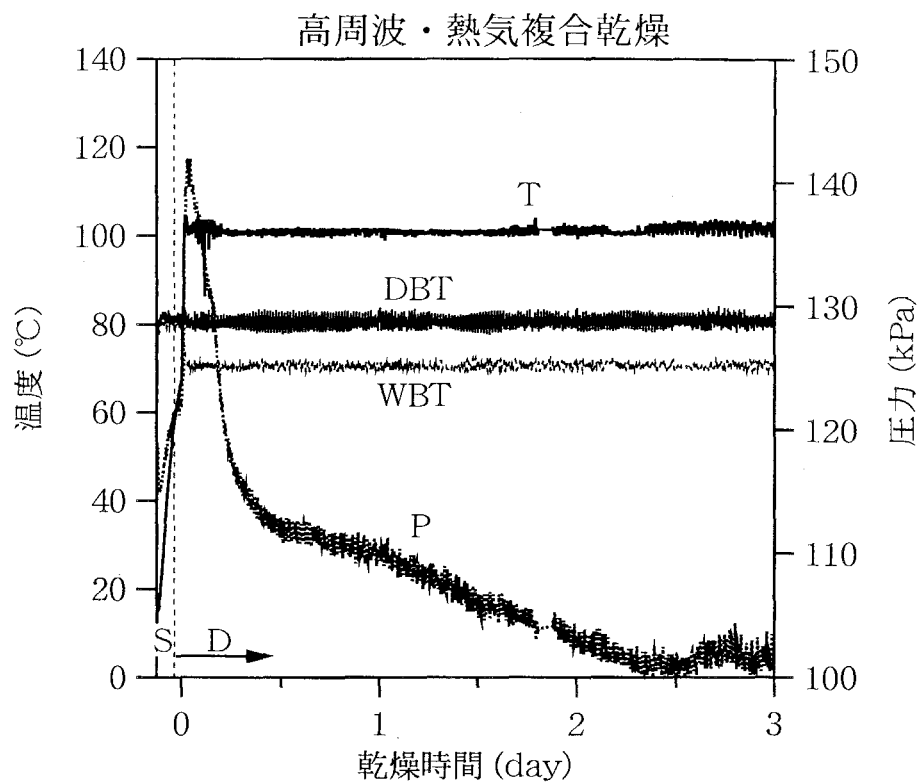


図4-7 材内温度および材内圧力の推移  
 DBT: 乾球温度 ; WBT: 湿球温度 ; T: 材内温度 ; P: 材内圧力  
 S: 蒸煮期間 ; D: 乾燥期間

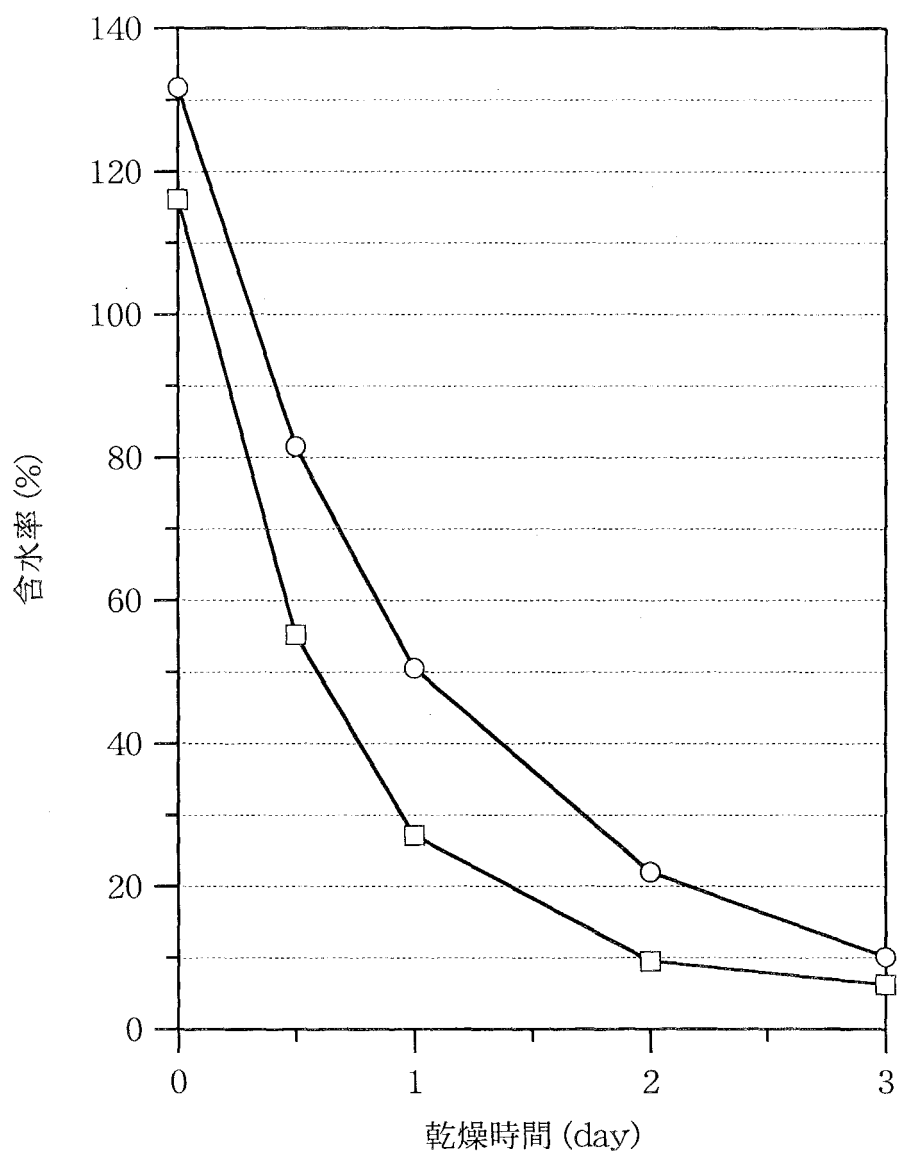


図4-8 高周波・熱気複合乾燥と高温乾燥の乾燥経過

—○— 高周波・熱気複合乾燥  
—□— 高温乾燥

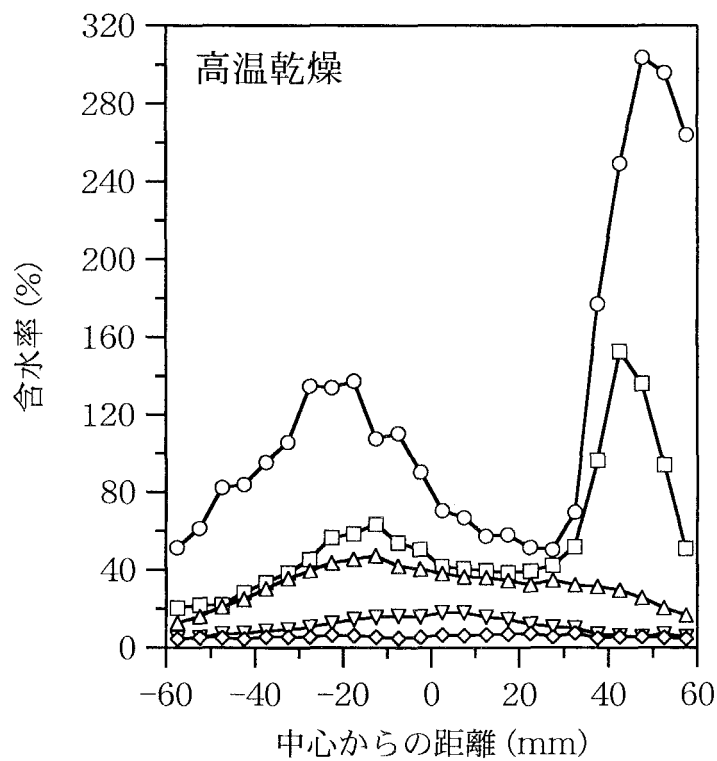
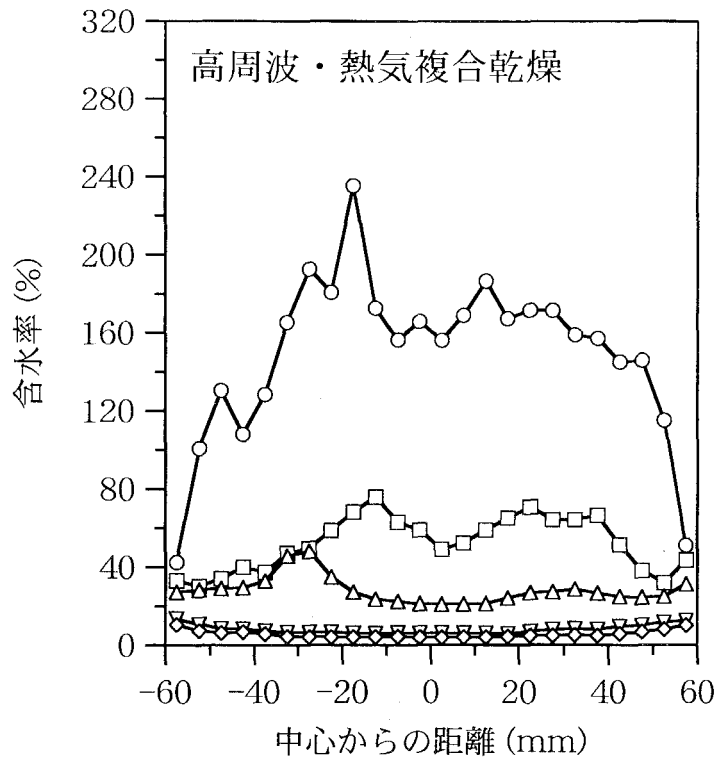


図4-9 乾燥過程の含水率分布  
 ○：乾燥前；□0.5日後；△：1日後；▽：2日後；◇：3日後



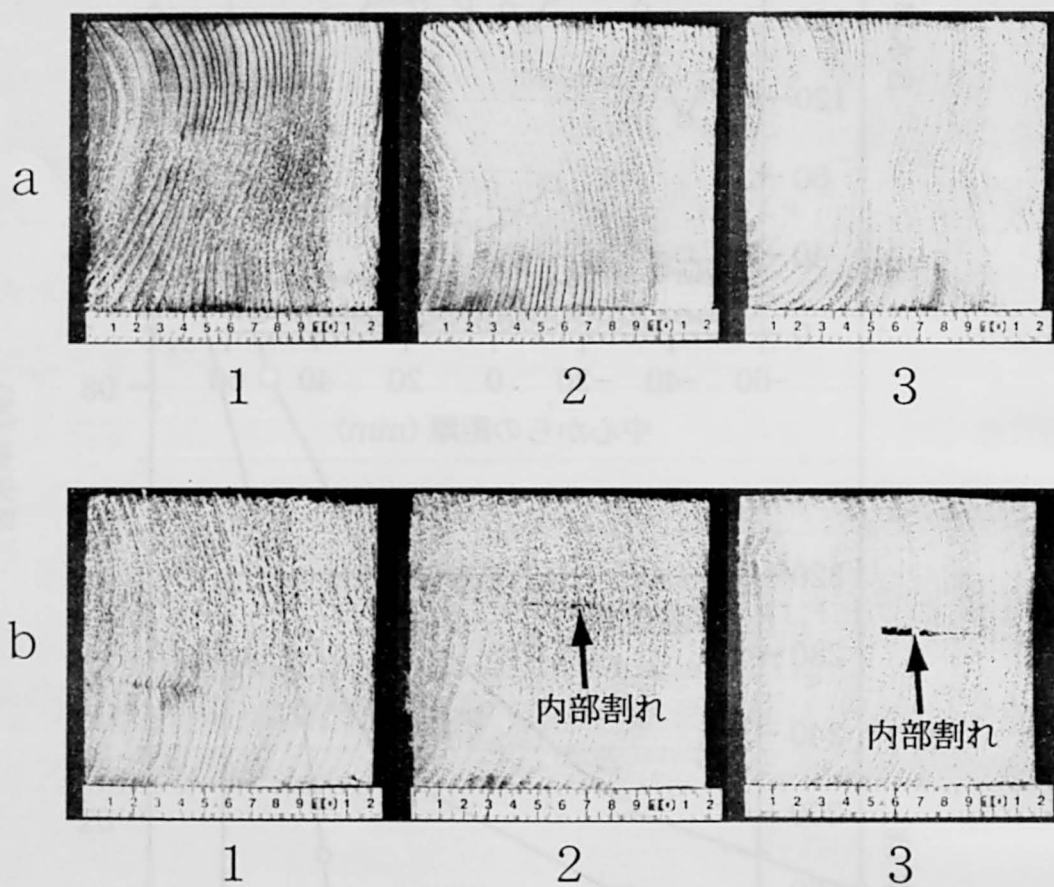


図4-10 乾燥過程における横断面

a: 高周波・熱気複合乾燥

b: 高温乾燥

1, 2, 3: 乾燥開始からそれぞれ1, 2, 3日後の横断面

### 4. 3 要 約

本章では、高周波・熱気複合乾燥における熱気乾燥の役割について検討し、高周波加熱との複合効果について明らかにした。さらに、高温乾燥との比較を行い、その機構の違いについて明らかにした。結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 熱気乾燥では、材内圧力はほとんど上昇せず、内部の含水率低下もほとんど見られなかった。
- 2) 高周波加熱では、材内圧力が急速に上昇して、内部の含水率の大きな低下をもたらしたが、含水率分布の平準化は遅れた。
- 3) 高温乾燥では、材内圧力の上昇は小さいが、内部の含水率低下は比較的大きくて、含水率分布も平準化された。しかし、内部割れが発生し、これが含水率分布の平準化に関与していた。
- 4) 高周波・熱気複合乾燥では、材内圧力の上昇が急速で大きく、これが駆動力となって内部水分を表層へ押し出すとともに、熱気乾燥によって表層の水分が除去される様子が確認された。内部割れは発生しなかったが、高周波加熱と熱気乾燥が補完しあって、含水率分布の平準化がもたらされた。

## 総 括

スギの利用は焦眉の問題である。スギの最大の用途は、製材として利用する建築用材であるが、ここでは、乾燥と水分管理が不可欠な要素となる。スギ製材の乾燥法には、熱気乾燥をはじめとする従来の方法が、針葉樹製材用に改良されて応用されている。しかし、これらの乾燥法では、スギ材の難乾燥性を克服できず、新しい乾燥法が求められていた。新しい乾燥法に求められる条件は、正角材や平角材のような大断面製材であっても、内部まで均一に乾燥できること、乾燥時間が短いこと、あるいは乾燥コストが低いことなどであるが、これらを同時に可能にするには、単一乾燥法では困難であると考えた。そこで、本研究では、上述の条件を満たすことができる乾燥法として、高周波加熱と熱気乾燥とを組み合わせ、高周波・熱気複合乾燥法とその装置を新たに開発した。その乾燥装置を用いて、新しい乾燥法のスギ製材への有効性を確認したうえで、その乾燥機構を考察した。

第1章では、スギ製材の乾燥の歴史と問題点、および従来法の得失を考察することから、新しい乾燥法が具備すべき条件を明確にした。これらの検討を経て、高周波・熱気複合乾燥法の着想に至った経緯を説明し、さらに本乾燥法の概要を述べた。さらに、木材乾燥法の中における高周波・熱気複合乾燥法の位置を確認した。

第2章では、高周波・熱気複合乾燥法の実用性を検討するために、種々の樹種および材種に適用して、実用装置の性能と操作性、実大材の乾燥特性、乾燥仕上がり状態、および乾燥コストについて調べた。

その結果、同時に収容するスギ製材を乾燥前に重量であらかじめ分別、ロット分けし、べた積みしてサイクル加熱による乾燥で、含水率の均一な仕上がり状態が期待できることを述べた。また、そのときの乾燥コストは、従来の乾燥法のそ

れに比べて、約 1 / 2 に低減できること、その理由は乾燥時間の短縮にあることを、さらに、高周波・熱気複合乾燥法は乾燥後の含水率分別に含水率計の使用が可能であることを示した。

第 3 章では、高周波・熱気複合乾燥における水分移動の駆動力を検討するために、スギ正角材を用いて、乾燥過程の含水率分布の推移、高周波加熱の水分移動への関与、および、水分移動における材内圧力の関与について考察した。

スギ正角材を高周波・熱気複合乾燥すると、中心温度の上昇による材内圧力の上昇が生じ、含水率は、まず中心付近と表層で低下し、中間部のそれが追従する推移を示した。乾燥の進行に伴って含水率分布は平準化された。高周波加熱のみでも、材内圧力の上昇と低下が観察された。材内圧力の大きさと低下のパターンによって、材内部の含水率低下の程度が異なった。また、材内圧力が最大値に達する部位が、乾燥の進行とともに中心から表層へと移り、それとともに横断面内の含水率分布の形態が変化した。最終的には常圧近くまで低下して収斂し、含水率分布は平準化されていた。材内圧力が作用したときの、内部水分の挙動を見るために、ガス圧を用いて中心から染料を圧入すると、染色部分が繊維に直角方向へも広がり、圧力の作用によって水分が材内を移動することが示唆された。

第 4 章では、高周波・熱気複合乾燥における熱気乾燥および高周波加熱の役割を論じた。さらに、高温加熱との比較を行い、両者の水分移動機構の違いを明らかにした。そのために、熱気乾燥、高周波加熱、および高周波・熱気複合乾燥における材内圧力の推移、乾燥経過および含水率分布の推移を比較した。その結果、以下のことが明らかにされた。

高周波加熱および高周波・熱気複合乾燥で見られた材内圧力の上昇は、熱気乾燥および高温乾燥では測定されず、また、含水率分布の推移も異なっていた。前 2 者と後 2 者とは内部加熱法と外部加熱法との違いがあり、乾燥のメカニズムが異なることが明らかにされた。とくに、高温乾燥では、乾燥は急速で含水率分布

は平準化された点で、高周波・熱気複合乾燥と共通していたが、その理由は内部割れの発生にあることが明らかになった。

スギ材は、我が国の最も重要な森林資源の一つであり、これの利用を促進することは、林業および林産業はもちろんのこと、地球環境保護の面からも重要なことである。スギ材の主な用途は製材であり、製材の利用、加工の入口は乾燥にある。本研究では、スギ製材の新しい乾燥法として高周波・熱気複合乾燥法を提案し、その乾燥機構を明らかにすることで、実用技術としての有効性を確認した。スギ資源利用の一助になれば幸いである。

## 文 献

- 1) 古山安之, 金川 靖, 林 和男: 木材学会誌 **41**, 710-717(1995).
- 2) 河崎弥生: 木材工業 **53**(4), 166-171(1998).
- 3) 河崎弥生: 木材工業 **51**(11), 541-546(1996).
- 4) Price, E. W., Koch, P.: *Forest Prod. J.* **30**(8), 41-47(1980).
- 5) 今村祐嗣: 木材研究・資料 No.31, 1-30(1995).
- 6) 小林好紀, 今村祐嗣, 飯田生穂, 渡辺宇外: *J. Wood Sci.* **44**, 432-437(1998).
- 7) 服部順昭, 安藤恵介, 喜多山繁, 久保 健, 小林好紀: 東京農工大学農学部附属演習林森林環境資源科学 No. 35, 53-60(1997).
- 8) 金川 靖, 安島 稔, 林 和男: 木材工業 **51**(6), 255-258(1996).
- 9) 寺澤 眞, 小林拓治郎: 木材工業 **29**(8), 327-331(1974).
- 10) 寺澤 眞, 金川 靖, 林 和男, 安島 稔: “木材の高周波真空乾燥”, 海青社, 大津, 1998, pp.68-81.
- 11) 寺澤 眞, 金川 靖, 林 和男, 安島 稔: “木材の高周波真空乾燥”, 海青社, 大津, 1998, pp.99-126.
- 12) 鷺見博史: 木材学会誌 **24**(6), 385-390(1978).
- 13) 片桐幸彦, 藤本登留, 豆田俊治, 近藤宏章: 木材工業 **56**(12), 617-620(2001).
- 14) 鷺見博史: 木材学会誌 **24**(6), 391-399(1978).
- 15) 西尾 茂: “木材乾燥の実際”, 日刊木材新聞社, 東京, 1983, pp.91-95.
- 16) Kobayashi, Y., Miura, I., Kawai, Y.: Proc. 6th International IUFRO Wood Drying Conference, Stellenbosch, RSA, 1999, pp.18-21.
- 17) 川井安生, 三浦 泉, 小林好紀, 中谷 勸, 河野義弘, 山本康二: 第 49 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 東京, 1999, p.135.
- 18) 小林好紀, 川井安生, 三浦 泉, 檜原正規: 第 49 回日本木材学会研究発

- 表要旨集，東京，1999，p.136.
- 19) 寺澤 眞，金川 靖，林 和男，安島 稔：“木材の高周波真空乾燥”，海青社，大津，1998，pp.74-77.
  - 20) 寺澤 眞：“木材乾燥のすべて”，海青社，大津，1994，pp.420-431.
  - 21) 小玉牧夫：“わかりやすい乾燥材生産の技術マニュアル”，全国木材組合連合会編，全国木材協同組合連合会，東京，2000，p.17.
  - 22) 小林好紀，小野広治：奈良県林試研報，No.18，50-54(1988).
  - 23) 久田卓興：“わかりやすい乾燥材生産の技術マニュアル”，全国木材組合連合会編，全国木材協同組合連合会，東京，2000，p.92.
  - 24) 寺澤 眞：“木材乾燥のすべて”，海青社，大津，1994，pp.99-102.
  - 25) 満久崇麿：“木材の乾燥”，東京，森北出版，1962，pp.248-254.
  - 26) 則元 京：マイクロ波による木材の塑性曲げ加工，木材研究資料，第 14 号，13-26(1979).
  - 27) 佐々木一久，河辺純一，森 稔：九大演報 No. 57，245-265(1987).
  - 28) 谷口義昭，西尾 茂：木材学会誌 **39**(3)，357-362(1993).
  - 29) 小林好紀，川井安生，三浦 泉：木材学会誌 **46**(4)，282-290(2000).
  - 30) 川井安生，小林好紀，則元 京：木材学会誌 **47**(1)，7-13(2001).
  - 31) Kawai, Y., Kobayashi, Y., Norimoto, M.: *J. Wood Sci.* **49**(1), 18-21(2003).
  - 32) 池田元吉：木材工業 **51**(11)，556-559(1996).
  - 33) 吉田孝久：木材工業 **51**(11)，546-549(1996).
  - 34) 小林好紀，三浦 泉，目黒 忠：第 47 回日本木材学会大会研究発表要旨集，高知，1997，p.153.
  - 35) 川井安生，小林好紀，三浦 泉：第 48 回日本木材学会大会研究発表要旨集，静岡，1998，p.140.

- 36) 三浦 泉, 川井安生, 小林好紀, 中谷 勸, 狩谷武司, 上田 守 : 第 49 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 東京, 1999, p.134.
- 37) Yata, S.: Sci. Rep. Yokohama Natl. Univ. Sect. II 34, 59-66(1987).
- 38) 川井安生, 小林好紀, 則元 京 : 木材学会誌 **48**(3), 136-144(2002).
- 39) 河崎弥生 : 鳥取大学連合大学院博士論文, 2000, p.138.
- 40) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 藤本登留 : 木材工業 **55**(8), 357-362(2000).



## 謝 辞

本研究の遂行ならびに論文の作成にあたり、終始、ご指導と激励を賜った京都大学木質科学研究所・則元 京教授に対し、また、秋田県立大学木材高度加工研究所・小林好紀教授に対し、心から感謝の意を表します。そして、論文のとりまとめに際し、多くのご教示をいただいた京都大学大学院農学研究科・増田 稔教授、京都大学木質科学研究所・川井秀一教授に謹んで感謝の意を表します。

実験の計画および解析に関して、貴重な助言・ご指導をいただいた京都府立大学大学院農学研究科・石丸 優教授、高知大学農学部・金川 靖教授に深く謝意を表します。実験の遂行ならびに結果のとりまとめに関して、秋田県職員・三浦 泉氏、秋田県立大学木材高度加工研究所・山内秀文講師、岡崎泰男講師、Orlando R. Pulido 流動研究員に多大なご協力をいただいた。心より感謝します。秋田県立大学木材高度加工研究所・佐々木光名誉教授、同所長・桑原正章教授、土居修一教授、飯島泰男教授、山内 繁助教授には、様々な観点からの有益な助言・激励をいただいた。謹んで謝意を表します。

実大の乾燥装置を用いた実証実験を行うに際し、関西電力株式会社、住金マネジメント株式会社（現鹿島プラント工業株式会社）・河野義弘氏、住金ヒルデブランド株式会社、山本ビニター株式会社、大阪木材工場団地協同組合ドライテック美原・森 健二郎氏ならびに秋田県林務部に助力をいただいた。また、株式会社ヤスジマには、高周波・熱気複合乾燥装置に関する技術的な助言をいただいた。ここに深く感謝します。

最後に、常日頃の研究活動について、暖かいご支援をいただいた秋田県立大学木材高度加工研究所の皆様心から感謝の意を表します。